



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Activación alcalina de mezclas de ceniza volante y escoria de alto horno colombianas y su aplicación en la fabricación de unidades de mampostería estructural

Fredy Mauricio García Marín

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Civil y Agrícola.
Bogotá D.C, Colombia
2019

Activación alcalina de mezclas de ceniza volante y escoria de alto horno colombianas y su aplicación en la fabricación de unidades de mampostería estructural

Fredy Mauricio García Marín.

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería-Estructuras.

Director:

Ph.D Juan Manuel Lizarazo Marriaga.
Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia.

Línea de Investigación:

Materiales de Construcción.

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación Análisis, Diseño y Materiales – GIES.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería. Departamento Ingeniería Civil y Agrícola.
Bogotá D.C, Colombia
2019

Dedicado a mi esposa e hijo.

Su amor e incondicional apoyo son
los motores para el crecimiento
profesional y personal.

Agradecimientos

Agradezco especialmente al Ingeniero Juan Manuel Lizarazo, Director de la Tesis, sus aportes científicos y apoyo constante fue fundamental para llevar a buen término el desarrollo de la investigación. A los laboratoristas Darío Moreno y Jorge Olarte quienes me acompañaron en el desarrollo de los diferentes ensayos. Al Ingeniero Hector Camilo Higuera con quien desarrollé las primeras investigaciones relacionadas y quien fue un constante apoyo durante el tiempo que duró la investigación.

Resumen

La creciente necesidad de implementar materiales ambientalmente amigables en la industria de la construcción, ha generado numerosas investigaciones orientadas a la reutilización de subproductos industriales como la ceniza volante, escoria de alto horno, ceniza de cascarilla de arroz entre otras, las cuales presentan propiedades cementantes similares al cemento portland ordinario, pero con la ventaja de una menor generación de CO₂ comparado con la cantidad generada durante la producción del cemento portland.

En consonancia con lo anterior, se buscó identificar una mezcla cementante compuesta por ceniza volante y escoria de alto horno con una proporción que garantizara una resistencia mecánica adecuada para su implementación en la fabricación de unidades de mampostería estructural. Se realizaron diferentes mezclas de mortero a partir de combinaciones de ceniza volante y escoria de alto horno y dichas combinaciones se sometieron a un proceso de activación mediante una solución alcalina compuesta por Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na₂SiO₃) en diferentes proporciones y concentraciones. Se identificó la combinación de ceniza volante y escoria de alto horno que mezclada junto con una determinada concentración de NaOH y Na₂SiO₃ proporciona el comportamiento mecánico adecuado en términos de resistencia a la compresión.

Posterior a la selección de la mezcla de mejor desempeño mecánico, se realizó un estudio detallado de dicha mezcla en relación a la trabajabilidad de la mezcla, los efectos de la temperatura de curado y la variación de la resistencia a la compresión con el tiempo.

Adicionalmente se realizó una revisión de la microestructura de la Mezcla de mejor desempeño mecánico utilizando el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

La investigación finalizó con la fabricación de unidades de mampostería estructural los cuales se caracterizaron en términos de su densidad, absorción y resistencia a la compresión. A partir de las unidades de mampostería se construyeron muretes utilizando un mortero de pega convencional y se estudió el comportamiento ante cargas axiales y cargas de tensión diagonal. Los resultados obtenidos experimentalmente fueron comparados con un modelo de elementos finitos.

Los resultados obtenidos durante la investigación y los cuales están consignados en el presente documento, permiten establecer que los morteros activados alcalinamente presentan un alto potencial de aplicación en la industria de la construcción, principalmente en prefabricados como las unidades de mampostería.

Palabras clave: (Mampostería, Cenizas Volantes, Escoria de Alto Horno, Activación Alcalina).

Abstract

The growing need to implement environmentally friendly materials in the construction industry, has generated numerous investigations oriented to the reuse of industrial by-products such as fly ash, blast furnace slag, rice husk ash among others, which present similar cementing properties to ordinary portland cement, but with the advantage of a lower generation of CO₂ compared to the amount emitted during the production of portland cement.

In line with the above, it was sought to identify a binder mixture composed by fly ash and blast furnace slag with a proportion that would guarantee adequate mechanical strength for its implementation in the manufacture of structural masonry units. Different mortar mixtures were made from combinations of fly ash and blast furnace slag and these combinations were subjected to an activation process by means of an alkaline solution composed by Sodium Hydroxide (NaOH) and Sodium Silicate (Na₂SiO₃) in different proportions and concentrations. We identified the combination of fly ash and blast furnace slag that mixed together with a certain concentration of NaOH and Na₂SiO₃ will provide the proper mechanical behavior in terms of compressive strength.

After the selection of the de mejor desempeño mecánico mixture, a detailed study of this mixture was carried out in relation to the workability of the mixture, the effects of the curing temperature and the variation of the compressive strength with time. Additionally, a review of the microstructure of the de mejor desempeño mecánico mixture was performed using the Scanning Electron Microscopy (SEM).

The research finished with the fabrication of structural masonry units which were characterized in terms of their density, absorption and compressive strength. From masonry units, walls specimen were built using a conventional mortar and studied the axial loads behavior and diagonal tension . The results obtained experimentally were compared with a finite element model.

The results obtained during the investigation and which are consigned in this document, allow to establish that the mortars activated alkaline have a high potential of application in the construction industry, mainly in prefabricated as masonry units.

Keywords: (Masonry Unit, Fly Ash, Ground granulated blast-furnace slag, Alkali Activation)

Contenido

	Pág.
1. Introducción	17
1.1 Objetivos	21
1.1.1 Objetivo General.....	21
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 Metodología.	23
1.2.1 Fase I. Estudio del Material Cementante.	23
1.2.2 Fase II. Selección Mezcla de mejor desempeño mecánico	25
1.2.3 Fase III. Estudio de la Mezcla de mejor desempeño mecánico.....	25
1.2.4 Fase IV. Fabricación de Unidades de Mampostería.....	26
1.2.5 Fase V. Evaluación Comportamiento Mecánico unidades de mampostería. ...	26
1.3 Limitaciones.	28
2. Estado del Arte.....	29
2.1 Materias Primas	32
2.1.1 Materiales Silico-Aluminosos	32
2.1.2 Solución Alcalina	34
2.2 Proceso de Activación Alcalina.....	35
3. Caracterización de Materiales	38
3.1 Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno.....	38
3.1.1 Composición Química.....	39
3.1.2 Densidad.	41
3.1.3 Finura.	42
3.1.4 Tamaño de partícula.	44
3.2 Arena.	46
3.3 Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio.	46
4. Desarrollo Experimental	48
4.1 Fase I. Estudio del Material Cementante.....	48
4.1.1 Combinaciones de Material Cementante	49
4.1.2 Solución Alcalina	50
4.1.3 Procedimiento de Mezcla.....	54
4.1.4 Resultados Fase I.....	55
4.2 Fase II. Selección Mezcla de mejor desempeño mecánico	61

4.2.1	Ensayo de Fluidéz.....	61
4.2.2	Efecto de la Temperatura.	63
4.2.3	Selección Mezcla de mejor desempeño mecánico.	69
4.3	Fase III. Estudio de la Mezcla de mejor desempeño mecánico.	70
4.3.1	Resultados Ensayo SEM.....	70
4.3.2	Comportamiento de la Resistencia a la Compresión con el tiempo.	72
4.4	Fase IV. Fabricación Unidades de Mampostería.....	74
4.4.1	Características Unidades de Mampostería.	74
5.	Ensayos de Caracterización Unidades de Mampostería.....	79
5.1	Ensayo de Densidad Unidad de Mampostería.	79
5.2	Ensayo de Absorción libre de agua.....	81
5.3	Resistencia a la Compresión de la Mampostería.	82
5.3.1	Resistencia a la compresión a partir de ensayo sobre Muretes.....	83
5.3.2	Resistencia a la Compresión de la mampostería a partir de los ensayos individuales en los materiales.	88
5.3.3	Evaluación del Módulo de Elasticidad aproximado a partir del Ensayo de compresión en Muretes.....	94
5.4	Ensayo de Resistencia la Corte. Tracción Diagonal en Muretes.	96
5.4.1	Fabricación de los Muretes.....	97
5.4.2	Proceso de Ensayo de los Muretes.	98
5.4.3	Resultados ensayo de tensión diagonal.	99
5.4.4	Mecanismo de Falla.	101
5.4.5	Comparación Mecanismo de Falla con Análisis de Elementos Finitos.....	102
6.	Conclusiones y recomendaciones	107
6.1	Conclusiones	107
6.2	Recomendaciones	109
7.	Bibliografía	115

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2-1. Partículas de Ceniza Volante. Aumento 1800X. Grupo GIES**	33
Figura 2-2. Partículas de Escoria de Alto Horno. Aumento 1800X. Grupo GIES.....	34
Figura 2-3. Descripción esquemática de la activación alcalina de la ceniza volante. Adaptada de [21].....	35
Figura 2-4. Descripción esquemática de la activación alcalina de la ceniza volante. Adaptada [21].....	36
Figura 3-1. Ceniza Volante. Elaboración Propia.**	38
Figura 3-2. Escoria de Alto Horno. Elaboración Propia.**	39
Figura 3-3. Equipo de Ensayo Le Chatelier. Universidad Nacional de Colombia.	41
Figura 3-4. Equipo de Ensayo Blaine.....	43
Figura 3-5. Análisis de tamaño de Partícula para la Ceniza volante y Escoria de Alto horno	45
Figura 3-6. Hidróxido de Sodio (NaOH) utilizado en la investigación. Elaboración Propia.	47
Figura 3-7. Silicato de Sodio (Na ₂ SiO ₃) utilizado en la investigación. Elaboración Propia.	47
Figura 4-1. Resultados Resistencia a la Compresión para las diferentes combinaciones de Cementante.....	57
Figura 4-2. Resultados consolidados de Resistencia a la Compresión para las diferentes combinaciones de Cementante.	59
Figura 4-3. Mezcla de mortero activado alcalinamente sobre mesa de flujo.	61
Figura 4-4. Resultados ensayo de Fluidez.....	62
Figura 4-5. Resistencia a la compresión en función de la temperatura de curado.	64

Figura 4-6. Densidad en función de la temperatura de curado.	65
Figura 4-7. Relación Densidad Vs Resistencia para diferentes temperaturas de curado.	67
Figura 4-8. Cambios internos en la Mezcla en función de la Temperatura de Curado.	68
Figura 4-9. Microestructura de la Mezcla de mejor desempeño mecánico seleccionada bajo diferentes ambientes de curado.	71
Figura 4-10. Probetas C3-1.5-8M en ambiente seco posterior al curado a 80°C durante 24 horas.....	72
Figura 4-11. Variación de la resistencia a la compresión en función de la edad de las probetas.....	73
Figura 4-12. Tabla D.3.6-1 de la NSR-10	75
Figura 4-13. Dimensiones UPV fabricada en la investigación. Unidades en cm	76
Figura 4-14. Molde metálico para la fabricación de las unidades de mampostería.	77
Figura 4-15. Unidad de mampostería fabricada durante el desarrollo de la investigación.	78
Figura 5-1. Fabricación y curado de muretes de mampostería.....	84
Figura 5-2. Curva Esfuerzo Deformación para los Muretes Ensayados.....	85
Figura 5-3. Mecanismo de falla muretes mampostería sometidos a compresión.....	87
Figura 5-4. Mecanismo de falla de las unidades de mampostería sometidas a compresión.	91
Figura 5-5. Mecanismo de falla en muretes sometidos a tensión diagonal.[27]	97
Figura 5-6. Fabricación y curado de muros para ensayo de tensión diagonal.	98
Figura 5-7. Montaje para ensayo de tensión diagonal.	99
Figura 5-8. Comportamiento Esfuerzo-Deformación Murete sometido a tensión diagonal.	101
Figura 5-9. Mecanismo de Falla en muretes sometidos a tensión diagonal.....	102
Figura 5-10. Modelo Muro sometido a Tensión Diagonal. Sap2000.	103
Figura 5-11. Estado de Esfuerzos respecto al Eje Z-Z.	104
Figura 5-12. Estado de Esfuerzos principales.	105

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 3-1. Composición Química de los materiales.	40
Tabla 3-2. Resultados ensayo de Densidad en Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno.	42
Tabla 3-3. Resultados ensayo de Finura en Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno....	44
Tabla 3-4. Tamaño promedio de Partícula a partir de Análisis en el Software ImageJ... ..	46
Tabla 4-1. Combinaciones de Material cementante estudiadas.	49
Tabla 4-2. Combinaciones de Solución Alcalina estudiadas.....	50
Tabla 4-3. Tipos de Mezclas y Cantidades de Material para las mezclas estudiadas.....	52
Tabla 4-4. Resumen de Propiedades Mezcla C3-1.5-8M Curada a 80°C	69
Tabla 5-1. Masa saturada y masa sumergida para la unidad de mampostería.....	80
Tabla 5-2. Masa seca para la unidad de mampostería.....	80
Tabla 5-3. Dimensiones de los Muretes ensayados.	84
Tabla 5-4. Resistencia a la Compresión de los Muretes ensayados.....	86
Tabla 5-5. Resistencia a la Compresión Unidades de Mampostería..	90
Tabla 5-6. Resistencia a la compresión del mortero de pega.	92
Tabla 5-7. Dimensiones de los muretes ensayados a tensión diagonal.	100

Lista de Símbolos y abreviaturas

CPO: Cemento Portland Ordinario.

CV: Ceniza Volante.

EAH: Escoria de Alto Horno.

NaOH: Hidróxido de Sodio.

Na₂SiO₃: Silicato de Sodio.

CO₂: Dióxido de carbono.

SEM: Microscopio Electrónico de Barrido. (Siglas en Ingles)

1.Introducción

El uso de la mampostería como material de construcción se remonta a civilizaciones antiguas, desde entonces se han utilizado diferentes tipos de unidades de mampostería, pasando por la piedra, las unidades de arcilla, unidades sílico-calcareas y unidades de mortero. Culturas como la Mesopotámica o la Egipcia utilizaban piedras naturales o talladas para desarrollar sus construcciones, ejemplo de ello son las pirámides egipcias que han resistido el paso de varios siglos. Luego de la utilización de la piedra, se elaboraron unidades de arcilla fabricadas a mano y secadas al ambiente. El anterior proceso, con unidades de arcilla, fue seguido por un tratamiento térmico en hornos, el cual mejoró las propiedades mecánicas de las unidades y permitió la industrialización del proceso de fabricación de los productos de arcilla. Con esto, se dio la masificación en su uso como material de construcción. La fabricación y uso de unidades sílico-calcareas fue posterior al uso de las unidades de arcilla y su utilización se dio inicialmente en Alemania. Las unidades de concreto fueron desarrolladas a finales del Siglo XIX cuando los procesos de fabricación y curado se aplicaron a nivel industrial. Actualmente, las materias primas más utilizadas para la fabricación de unidades de mampostería son las unidades en arcilla cocida y las unidades en mortero y concreto.

La investigación reciente entorno a las unidades de mampostería no solo se ha enfocado en el mejoramiento de propiedades mecánicas, también se ha encaminado en la búsqueda

de nuevas materias primas que permitan disminuir los impactos ambientales y económicos que conlleva la utilización, principalmente, de la arcilla y el concreto.

En el proceso de fabricación de unidades de mampostería, tanto de arcilla cocida como de concreto, se producen impactos ambientales considerables y costos de producción elevados debido a las características de las materias primas y del tratamiento térmico necesario para obtener las resistencias requeridas.

Respecto a las unidades de arcilla cocida, los principales problemas ambientales están asociados con la destrucción de extensas áreas de tierra cultivables para la extracción de la arcilla, razón por la cual en algunos países como China se está limitando el uso de arcilla para la fabricación de unidades de mampostería. Por otra parte, la fabricación de unidades en arcilla requiere que éstas sean sometidas a un proceso de cocción el cual se realiza a temperaturas que superan los 1000 °C. Para alcanzar dichas temperaturas se necesita un gasto energético considerable que se traduce en aumento en los costos de producción sumado a que los combustibles utilizados para alcanzar dichas temperaturas generan emisiones de gases de efecto invernadero, ahondando el problema ambiental asociado a la fabricación de estas unidades. [1], [2]

En cuanto a la fabricación de unidades de mampostería de concreto, los impactos ambientales más relevantes se asocian a la producción del cemento portland utilizado para la fabricación de las unidades. A la producción del cemento portland se le asocia aproximadamente el 7% del total de emisiones de CO₂ a nivel mundial [3].

Dentro de las investigaciones que recientemente se vienen realizando, en cuanto a materiales cementantes alternativos al cemento portland, se encuentran los cementos activados alcalinamente o geopolímeros. La activación de estos cementos se produce por

la reacción entre un material silico-aluminoso y un activador alcalino, la cual genera un material cementante con características similares a las que se obtienen con la utilización del cemento portland. Los materiales silico-aluminosos son aquellos cuya composición es principalmente alúmina y sílice, por ejemplo, las cenizas volantes y las escorias de alto horno. Por su parte, el activador alcalino es una solución, de elevada alcalinidad, entre un compuesto químico y una solución acuosa. Los compuestos químicos más utilizados para elaborar esta solución alcalina son el hidróxido de sodio y el silicato de sodio. Para que la reacción entre el material silico-aluminoso y el activador alcalino se produzca de manera completa, la mezcla debe ser curada a una temperatura de 80°C aproximadamente, para así garantizar la polimerización de sus componentes. Estos materiales desarrollan altas resistencias mecánicas a cortas edades, lo cual los convierte en materiales atractivos para ser investigados y aplicados en las diferentes áreas de la Ingeniería Civil.

Los materiales silico-aluminosos que se han empleado para la investigación de los cementos alcalinamente activados son principalmente las cenizas volantes y las escorias de alto horno. Estos materiales además de tener la composición química que permite llevar a cabo el proceso de activación alcalina, presentan un atractivo adicional al ser subproductos industriales. La ceniza volante se obtiene en las chimeneas de las termoeléctricas y son el producto de la combustión del carbón mineral utilizado en estas centrales. La escoria de alto horno se obtiene durante el proceso de refinación del hierro en las siderúrgicas y es un material compuesto por las impurezas presentes en los minerales utilizados para producir hierro. [4]–[6]

La utilización de los cementos activados alcalinamente como materia prima para la fabricación de unidades de mampostería, garantizando propiedades mecánicas y de durabilidad aceptables, puede ser una alternativa para disminuir el uso de materiales que

generen un impacto ambiental directo, ya que los cementos activados alcalinamente al utilizar materiales provenientes de subproductos industriales, reducen significativamente los impactos asociados a la extracción o producción de materias primas para la fabricación de unidades de mampostería. Adicionalmente, en el proceso industrial para la fabricación de unidades de mampostería se produciría un cambio sustancial, debido a la notable disminución en las temperaturas usadas respecto a las unidades de arcilla cocida, ya que se pasaría de utilizar temperaturas superiores a los 1000°C por temperaturas que no superan los 100°C. Lo anterior se traduce en la disminución notable en los costos de producción.

La creciente necesidad por estudiar e investigar materiales de construcción que sean, principalmente, ambientalmente amigables pero que garanticen propiedades de resistencia y de durabilidad iguales, o incluso superiores a las que presentan los materiales que actualmente se utilizan, se ha convertido en un reto y en una oportunidad para ahondar en la búsqueda de este tipo de materiales. En este sentido los cementos activados alcalinamente se están convirtiendo en una posibilidad real para investigar y aplicar en casos prácticos de ingeniería. Asociado a lo anterior, los problemas ambientales y económicos que presenta la producción de unidades de mampostería se transforman en una oportunidad ideal para investigar si los cementos alcalinamente activados pueden ser una alternativa real y aplicable a corto plazo en la fabricación de unidades de mampostería.

1.1 Objetivos

A continuación se describen los objetivos generales y específicos planteados para el desarrollo de la investigación.

1.1.1 Objetivo General.

Utilizar los morteros fabricados a partir de un proceso de activación alcalina de mezclas de ceniza volante y escoria, como materia prima para la fabricación de unidades de mampostería estructural.

1.1.2 Objetivos Específicos.

- Determinar una mezcla de ceniza volante y escoria de alto horno, activada alcalinamente, que presenta las mejores propiedades mecánicas (Mezcla de mejor desempeño mecánico).
- Medir las propiedades mecánicas de los morteros de ceniza volante y escoria de alto horno activados alcalinamente.
- Fabricar unidades de mampostería estructural, a partir de la mezcla de mejor desempeño mecánico, y evaluar sus propiedades mecánicas y de durabilidad.
- Establecer si las unidades de mampostería estructural fabricadas con ceniza volante y escoria activada alcalinamente, pueden ser utilizadas como material de

construcción de acuerdo a los requerimientos establecidos en la normatividad colombiana.

1.2 Metodología.

La metodología de investigación implementada en durante el desarrollo de la investigación estuvo dividida en 5 Fases principales. Dichas Fases se describen a Continuación.

1.2.1 Fase I. Estudio del Material Cementante.

La Fase I estuvo dividida en cuatro procedimientos:

a. Revisión bibliográfica.

Revisión detallada de todas las fuentes de consulta de las cuales se va a tomar información para la realización del presente trabajo.

b. Caracterización física y química de materiales.

Se realizaron ensayos físicos y químicos para caracterizar los diferentes materiales utilizados durante el desarrollo de la investigación. Algunos de los ensayos realizados fueron:

Ensayos Sobre Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno.

- Composición Química
- Densidad
- Finura
- Tamaño de Partícula mediante Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Ensayos sobre Arena.

- Granulometría.

c. Elaboración del diseño experimental de la investigación.

Se elaboró un diseño experimental que permitiera estudiar las variables más relevantes para determinar la mezcla de mortero óptima para la fabricación de las unidades de mampostería. Dichas variables son:

- El porcentaje de combinación entre la ceniza volante y escoria de alto horno óptimo para la fabricación del mortero.
- La concentración de la solución alcalina (activador alcalino) que permite desarrollar la mayor resistencia a la compresión.

El diseño experimental planteado conllevó al estudio de 36 diferentes mezclas.

d. Fabricación de Cubos de Mortero

Se realizó la fabricación de 3 cubos de mortero de 5cm de arista para cada una de las 36 mezclas propuestas en el diseño experimental para un total de 108 cubos. Los cubos fabricados se sometieron a un proceso de curado a temperatura ambiente durante 7 días.

Posterior al curado, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión y se determinaron 3 mezclas con las mayores resistencias a la compresión.

1.2.2 Fase II. Selección Mezcla de mejor desempeño mecánico

La Fase II de la investigación se centró en profundizar el estudio sobre las 3 mezclas de mayor resistencia seleccionadas en la Fase I con el fin de obtener información adicional para determinar la Mezcla de mejor desempeño mecánico.

La Fase II de la investigación se compone de los siguientes procedimientos:

- Determinar la trabajabilidad de las mezclas a partir del ensayo de Fluidez.
- Determinar la densidad de las mezclas.
- Estudiar el efecto de la temperatura de curado en la resistencia de las mezclas.

Basados en los resultados obtenidos en la Fase II, se seleccionó la mezcla de mejor desempeño mecánico con la cual se fabricaron las unidades de mampostería.

1.2.3 Fase III. Estudio de la Mezcla de mejor desempeño mecánico.

Una vez seleccionada la mezcla de mejor desempeño mecánico, se realizaron ensayos para determinar las características micro-estructurales de la mezcla seleccionada, lo cual

se realizó mediante un análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), y el comportamiento de la resistencia a la compresión en función del tiempo.

1.2.4 Fase IV. Fabricación de Unidades de Mampostería

La Fase IV consistió en la fabricación de las Unidades de Mampostería a partir de la Mezcla de mejor desempeño mecánico seleccionada en las Fases anteriores. En esta Fase se determinó la geometría de la unidad de mampostería y se fabricó el molde metálico que permitió fundir las respectivas unidades.

1.2.5 Fase V. Evaluación Comportamiento Mecánico unidades de mampostería.

Se evaluaron propiedades físicas y mecánicas en las unidades de mampostería estructural, tales como:

- Masa, densidad y volumen.
- Absorción de agua.
- Resistencia a la compresión.
- Módulo de elasticidad.
- Resistencia a la tensión diagonal.

A partir de los resultados obtenidos en cada una de las Fases desarrolladas en la investigación, se determinó la viabilidad del uso del mortero activado alcalinamente para la fabricación de unidades de mampostería.

1.3 Limitaciones.

La investigación desarrollada buscó analizar y comprender el comportamiento de unidades de mampostería fabricadas a partir de un mortero activado alcalinamente, sin embargo, el alcance de la investigación es limitado debido a que no fue posible fabricar una suficiente cantidad de unidades de mampostería que permitiera estudiar a detalle el comportamiento mecánico, de las unidades y de los elementos contruidos a partir de dichas unidades, bajo diferentes condiciones de carga, como por ejemplo, condiciones de carga horizontal.

Se espera que los resultados presentados en este documento sean un insumo para futuras investigaciones.

2. Estado del Arte.

A continuación se presenta una recopilación bibliográfica de investigaciones realizadas en torno al estudio de los procesos de activación química de materiales silicoaluminosos, en especial, aquellas enfocadas en la activación de cenizas volantes y escorias de alto horno. Finalmente se presentará una revisión realizada en relación a las características que deben cumplir las unidades de mampostería estructural de acuerdo a los criterios establecidos por el Código de Construcciones Sismoresistentes de Colombia (NSR-10).

Aunque las investigaciones relacionadas con el uso de materiales cementantes suplementarios al cemento portland se ha venido estudiando desde 1939, solo fue hasta 1965 que Glukhovsky introduce el término de cemento alcalino y en 1979 Davidovits define los cementos alcalinos como geopolimeros. El término “geopolimero” hace referencia a aquellos materiales sólidos que han sido sintetizados a partir de la reacción entre materias primas silicoaluminosas y una solución altamente alcalina, es decir, los geopolimeros se generan a partir de un proceso de activación alcalina de las materias primas. Los materiales sólidos sintetizados presentan propiedades mecánicas comparables con las desarrolladas a partir del proceso de hidratación del cemento. [5][7][8].

Los geopolímeros surgieron inicialmente como una alternativa viable para ser usados como recubrimientos para protección contra el fuego pero a medida que se investigaban estos materiales, sobresalían las excelentes propiedades mecánicas que estos materiales desarrollaban y de su potencialidad de aplicación como material cementante.[8][7][9][6]

Los materiales cuyo componente básico es la sílice y la alúmina, son catalogados como materiales puzolánicos, debido a que son materiales que por sí solos no desarrollan propiedades cementantes pero que finamente molidos y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio liberado en el proceso de hidratación del cemento portland, proceso conocido como reacción puzolánica. Con base en el anterior principio, la industria cementera ha utilizado por años las adiciones puzolánicas como mecanismo para reemplazar parcialmente el cemento portland en la producción de concretos y morteros. La limitación en el porcentaje de reemplazo de puzolanas por cemento portland está directamente relacionado con la cantidad de Hidróxido de calcio producido durante el proceso de hidratación del cemento, es decir, que si se realiza un reemplazo de puzolanas en cantidades mayores a las que reaccionarán con el hidróxido de calcio, las puzolanas que no reaccionan no aportan resistencia a la matriz cementante, por el contrario, reducen la resistencia mecánica.[10]–[14]

Con el objetivo de optimizar el uso de las puzolanas como material de construcción, las investigaciones se han concentrado en potencializar la reacción puzolánica mediante un mecanismo de reacción controlada. Mediante la reacción controlada se busca que los materiales puzolánicos reaccionen en un ambiente similar al que encuentran dentro de la matriz de cemento. En este sentido, las investigaciones se centraron en encontrar un

producto que produjera los mismos resultados obtenidos cuando el hidróxido calcio reacciona con los materiales puzolánicos.

El avance en las investigaciones relacionadas con los procesos de activación alcalina y con la subsecuente generación de geopolímeros, ha tenido un interés notable debido a la posibilidad de reutilizar subproductos de otras industrias como materia prima. Las ventajas relacionadas con el uso de materiales provenientes de otras industrias, radica en la posibilidad de disminuir las emisiones de CO₂ asociadas a la producción del cemento portland, debido a que el porcentaje de cemento portland en los geopolímeros es nula.[3].

2.1 Materias Primas

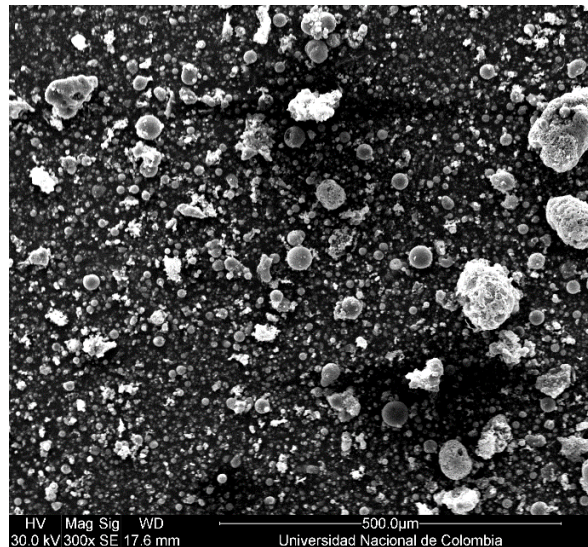
Dentro del estudio de los procesos de activación alcalina, es necesario estudiar las materias primas utilizadas, ya que las características de estos materiales definirán la variabilidad en los procesos de activación. Las materias primas básicas en los procesos de activación alcalina corresponden a materiales Silico-aluminosos y a la solución alcalina.

2.1.1 Materiales Silico-Aluminosos

Las materias primas utilizadas principalmente en las investigaciones sobre activación alcalina han sido las cenizas volantes y las escorias de alto horno, aunque es necesario aclarar que no son los únicos materiales con potencialidad de ser activados alcalinamente. Todo material con altos contenidos de sílice y alúmina en su composición química presenta potencial para ser activado. Las cenizas volantes y las escorias de alto horno se han utilizado como reemplazo parcial del cemento portland en la producción de concretos y morteros convencionales. La norma colombiana NTC 3823 regula el uso de cenizas volantes en la producción de concreto y mortero.

Las cenizas volantes son un subproducto industrial del proceso de combustión del carbón mineral en las termoeléctricas. Se les conoce como cenizas volantes debido a que viajan en los gases de combustión. Las cenizas volantes son recolectadas en las chimeneas de las termoeléctricas mediante el uso de filtros de capacidad electrostática. Debido al proceso de transporte en los gases de combustión al que se ven sometidas las cenizas volantes, las partículas de ceniza presentan una forma esférica, como se puede apreciar en la Figura

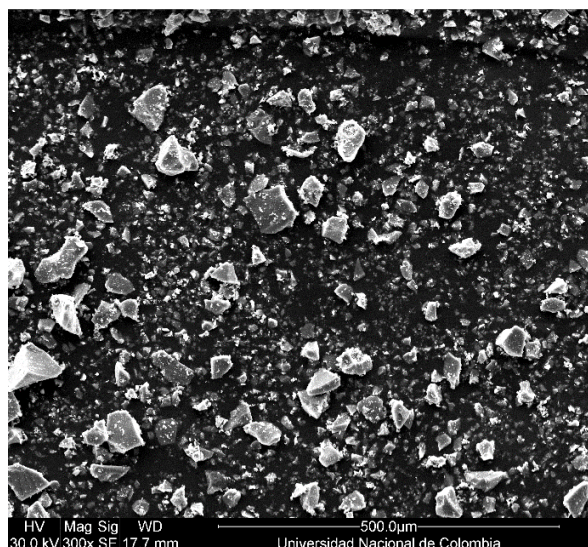
Figura 2-1. Partículas de Ceniza Volante. Aumento 1800X. Grupo GIES**



Las E.A.H se generan a partir del proceso de fundición del hierro en las siderúrgicas. Este material representa un subproducto de este proceso industrial y durante años fue catalogada como un residuo industrial sin aplicación alguna y se disponía en rellenos sanitarios. [9]. Actualmente las E.A.H son utilizadas ampliamente como reemplazo parcial del cemento debido a sus características puzolanicas. La adición de E.A.H mejora, entre otras, la resistencia del concreto a los ataques por agentes nocivos en ambientes agresivos.[15]

**Grupo de Investigación Análisis, Diseño y Materiales (GIES) Universidad Nacional de Colombia.

Figura 2-2. Partículas de Escoria de Alto Horno. Aumento 1800X. Grupo GIES



2.1.2 Solución Alcalina

El tipo de solución alcalina utilizada en el proceso de activación alcalina definirá la eficiencia de la reacción y por tanto las características y propiedades del material sintetizado. Las investigaciones realizadas, han encontrado que las soluciones alcalinas a base de Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio presentan la mayor eficiencia al usarse como activador de los materiales silicoaluminosos. Uno de los aspectos claves en el proceso de activación alcalina, corresponde a la preparación de la solución alcalina, especialmente en cuanto a la relación entre NaOH y el Silicato de sodio. Se ha podido establecer que una relación adecuada entre Silicato de Sodio (SS) e Hidróxido de Sodio (NaOH) se encuentra entre 1-1,5 (SS/NaOH). [16].

Otros compuestos químicos se han utilizado como activadores alcalinos en la producción de geopolímeros, entre ellos el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$). [9], [17]–[20]. Adicional a la eficiencia de la solución alcalina a base de NaOH y

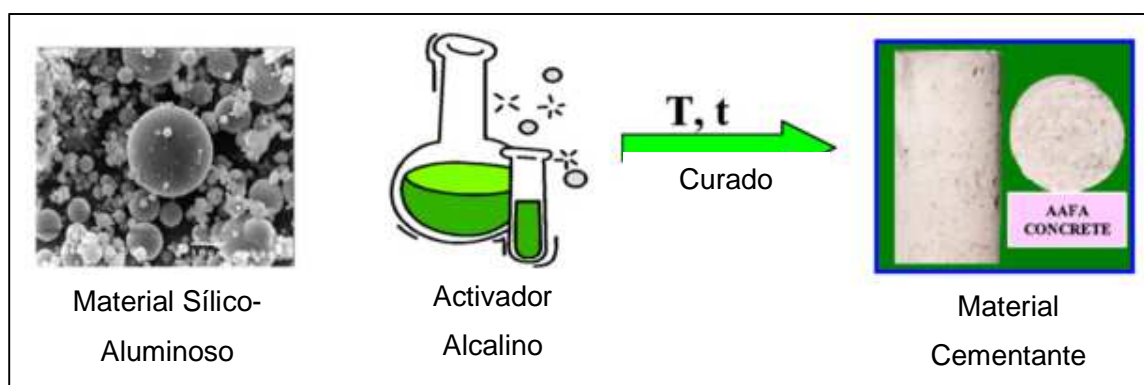
Silicato de sodio, estos productos químicos son producidos industrialmente, lo cual facilita el acceso a estos productos sin incurrir en elevados costos económicos.

La solución alcalina es determinante para el desarrollo de las propiedades mecánicas de los geopolímeros.

2.2 Proceso de Activación Alcalina

El proceso de activación alcalina se puede describir como la mezcla entre un material sólido con alto contenido de sílice y alúmina y un compuesto líquido alcalino. Esta mezcla puede asemejarse a la mezcla del Cemento portland y el agua. En la Figura 2-3 se presenta una representación esquemática del proceso de activación alcalina de la ceniza volante hasta alcanzar un material cementante con propiedades mecánicas aceptables,

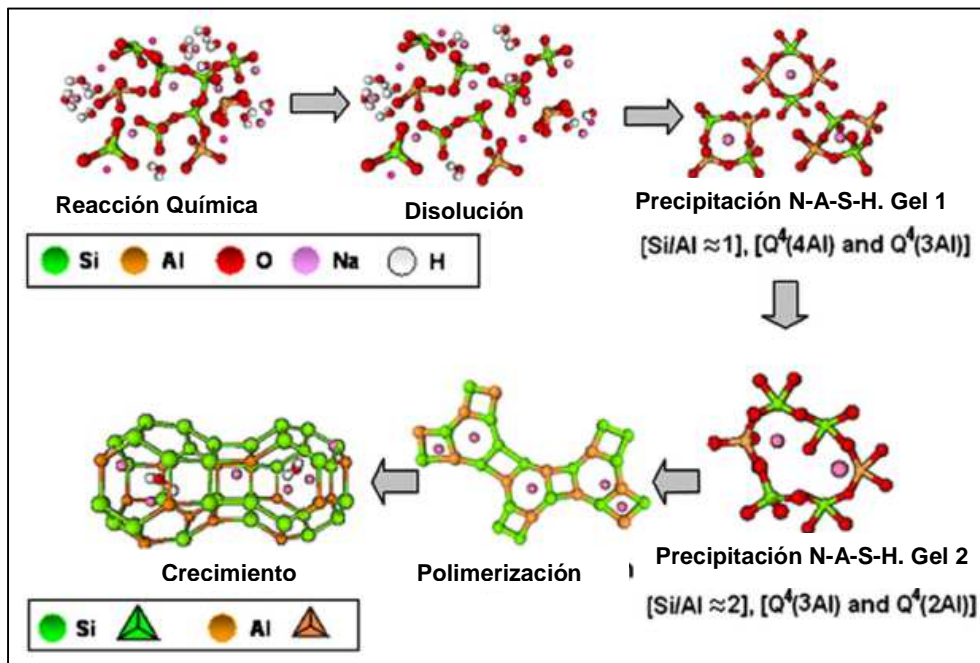
Figura 2-3. Descripción esquemática de la activación alcalina de la ceniza volante. Adaptada de [21]



El proceso mediante el cual el material Sílico-aluminoso se transforma en un material con propiedades cementantes y de resistencia mecánica similares a las obtenidas durante el proceso de hidratación del cemento portland, es un proceso complejo que implica comprender los procesos de reacción y transformación de los materiales una vez estos entran en contacto con la solución alcalina. La Figura 2-4 presenta un modelo descriptivo del proceso de activación alcalina de los materiales Sílico-aluminosos. El proceso de activación alcalina puede asemejarse al proceso de síntesis de las zeolitas [5], [7], [14], [22]–[25], el cual corresponde a un proceso de polimerización. En el caso de la activación alcalina, se presentan las siguientes fases:

Figura 2-4. Descripción esquemática de la activación alcalina de la ceniza volante.

Adaptada [21]



- a. Se produce un ataque químico de la solución alcalina sobre las partículas que conforman el material silicoaluminoso. La reacción química generada entre la solución alcalina y el material sólido trae como resultado la formación de productos inestables que aún no aportan a la resistencia mecánica del material.
- b. A medida que avanza el proceso de reacción entre la solución alcalina y el material silicoaluminoso sólido, se presenta una precipitación de los productos de reacción, formando un gel 1 denominado *N-A-S-H*. [21] [18], [19], [21]. A medida que se forma el gel *N-A-S-H* y se acumula, gel 2, éste inicia un proceso de polimerización.
- c. Del crecimiento de estas cadenas poliméricas depende la resistencia mecánica del material cementante asociado a la activación alcalina

El gel *N-A-S-H* representa para los compuestos activados alcalinamente el equivalente al gel *CSH* (Silicato Hidratado de Calcio) generado durante el proceso de hidratación del cemento portland.

3. Caracterización de Materiales

Se realizó un proceso de caracterización de las propiedades de los materiales utilizados en el desarrollo de la investigación.

3.1 Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó Ceniza Volante presentada en la Figura 3-1.

Figura 3-1. Ceniza Volante. Elaboración Propia.**



La E.A.H fue sometida a un proceso de molienda con el fin de reducir el tamaño de la partícula para optimizar su proceso de reacción con la solución alcalina.

*** Ceniza Volante proveniente de la Central Termoeléctrica TERMOPAIPA.

Figura 3-2. Escoria de Alto Horno. Elaboración Propia. **



Con el fin de caracterizar las propiedades físicas y químicas de la ceniza volante y la escoria de alto horno, se realizaron los siguientes ensayos.

3.1.1 Composición Química.

La composición química se obtuvo a partir de un ensayo de caracterización denominado Fluorescencia de Rayos X***. En la Tabla 3-1 se presentan los resultados obtenidos para la composición química de la Ceniza Volante y la Escoria de Alto Horno.

** La Escoria de Alto Horno fue proporcionada por la empresa ARGOS S.A.

*** El Ensayo de Fluorescencia de Rayos X se realizó en los Laboratorios de la Universidad Nacional.

Tabla 3-1. Composición Química de los materiales.

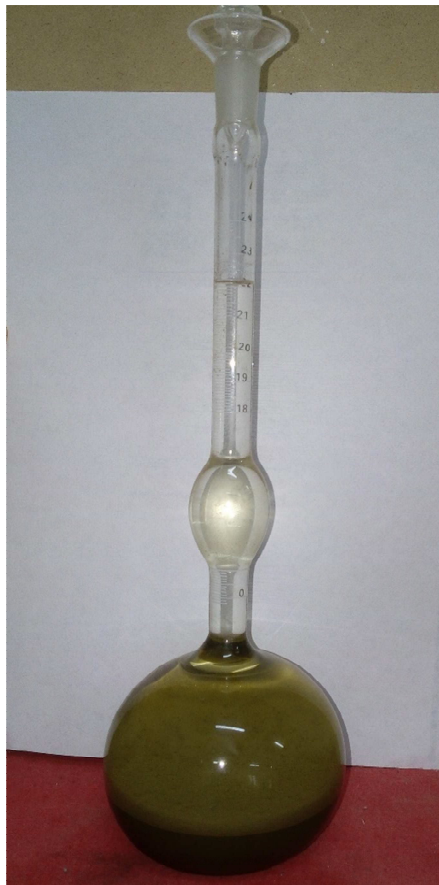
Ceniza Volante.		Escoria de Alto Horno	
Elemento y/o Compuesto	% en Peso	Elemento y/o Compuesto	% en Peso
SiO ₂	60.52%	CaO	43.36 %
Al ₂ O ₃	23.73%	SiO ₂	32.72 %
Fe ₂ O ₃	5.41%	Al ₂ O ₃	12.46 %
CaO	3.78%	SO ₃	3.80 %
K ₂ O	1.46%	MnO	3.45 %
SO ₃	1.40%	MgO	1.52 %
TiO ₂	1.32%	Fe ₂ O ₃	0.86 %
P ₂ O ₅	0.82%	TiO ₂	0.49 %
MgO	0.57%	K ₂ O	0.43 %
Na ₂ O	0.48%	Na ₂ O	0.32 %
Ba	0.17%	Ba	0.26 %
Sr	0.11%	P ₂ O ₅	0.13 %
Zr	0.04%	Sr	0.08 %
Cl	0.03%	Cl	0.04 %
V	0.03%	Zr	0.03 %
MnO	0.03%	V	0.02 %
Cr	0.02%	Y	0.02 %
Cu	0.02%	Zn	69 ppm
Zn	0.02%	Rb	23 ppm
Rb	0.01%		
Pb	0.01%		
Y	62 ppm		
Nb	31 ppm		

Se observa que el porcentaje de sílice y alúmina en la composición química de la ceniza volante y escoria de alto horno es significativamente alta y confirma su potencial de ser aplicada en los procesos de activación alcalina.

3.1.2 Densidad.

Debido a que las características físicas de las cenizas volantes y las escorias de alto horno son similares de las del cemento portland ordinario, se decidió realizar el Ensayo de Densidad siguiendo los lineamientos de la NTC 221 “CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO”. Ver Figura 3-3.

Figura 3-3. Equipo de Ensayo Le Chatelier. Universidad Nacional de Colombia.



El ensayo se basa en el desplazamiento de volumen generado por una masa conocida.

La densidad se determina a partir de la ecuación Ec. 3-1.

:

$$d = \frac{m}{V_0 - V_f} \quad \text{Ec. 3-1}$$

Donde

d: Densidad (g/cm³)

m: Masa material. (g)

V₀: Volumen inicial medido en el frasco de Le Chatelier.(cm³)

V_f: Volumen final medido en el frasco de Le Chatelier. (cm³)

Los resultados presentados en la Tabla 3-2 muestran que la densidad de la Escoria de Alto Horno es similar a la densidad esperada para un cemento portland ordinario, la cual debe estar alrededor de 3.00 g/cm³

Tabla 3-2. Resultados ensayo de Densidad en Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno.

Material	<i>m (g)</i>	<i>V₀ (cm³)</i>	<i>V_f (cm³)</i>	<i>d (g/cm³)</i>
Ceniza Volante	45.738	0.55	21.65	2.168
Escoria de Alto Horno	63.997	0.7	22.55	2.929

3.1.3 Finura.

El ensayo para determinar la Finura de la ceniza Volante y la Escoria de Alto Horno, se realizó utilizando los lineamientos de la NTC 33 “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA.

MÉTODO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRÁULICO POR MEDIO DEL APARATO BLAINE DE PERMEABILIDAD AL AIRE” Ver Figura 3-4.

Figura 3-4. Equipo de Ensayo Blaine.



La finura del material será un indicativo de la reactividad de éste, a mayor finura mayor será la reactividad del material debido a una mayor superficie específica de contacto, lo cual potenciará el proceso de activación alcalina. De acuerdo al ensayo Blaine, la finura (S) de los materiales se determina mediante la ecuación Ec-3-2.

$$S = \frac{K \cdot \sqrt{t}}{d \cdot \sqrt{n}} \quad \text{Ec. 3-2}$$

Donde

S : Finura del Material (cm^2/g)

t : Tiempo requerido para el paso del aire a través de la muestra de material (s)

d : Densidad del Material (g/cm^3)

K : 17.2

$$\sqrt{n} = 0.01344$$

Los resultados obtenidos a partir del ensayo de finura son presentados en la Tabla 3-3. Se observa que la ceniza volante presenta una finura mayor lo cual puede estar asociado a factores como la eficiencia de la planta termoeléctrica.

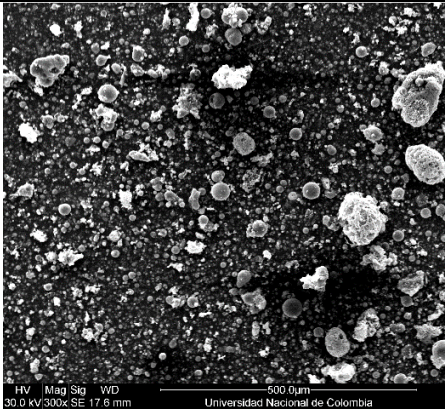
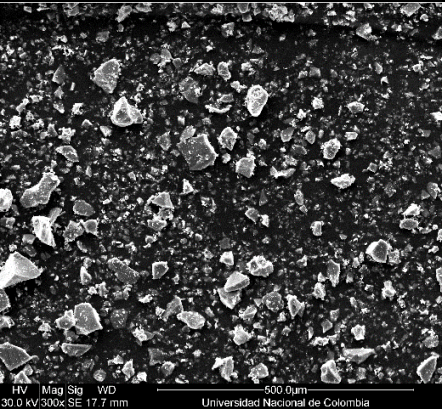
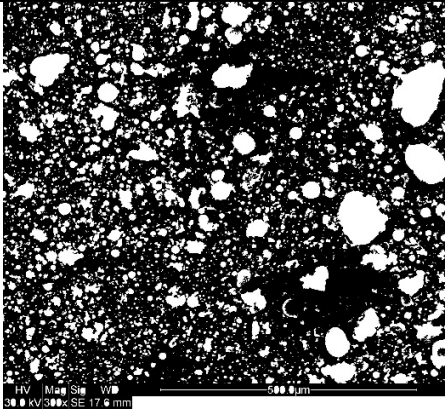
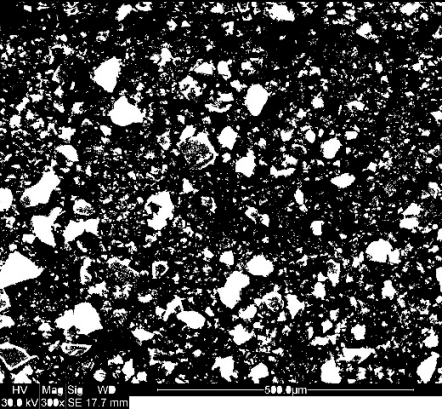
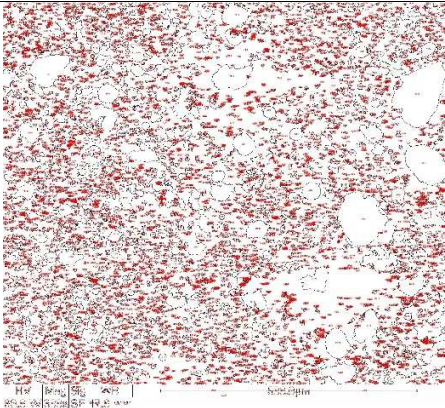
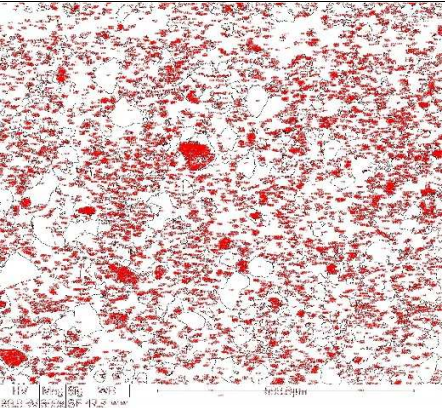
Tabla 3-3. Resultados ensayo de Finura en Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno.

Material	t (seg)	d (g/cm^3)	K	\sqrt{n}	S (cm^2/g)
Ceniza Volante	40.405	2.168	17.2	0.013	3752.77
Escoria de Alto Horno	57.58	2.929	17.2	0.013	3315.56

3.1.4 Tamaño de partícula.

A partir de las imágenes obtenidas del Microscopio Electrónico de Barrido se analizó el tamaño promedio de partícula. Para realizar este análisis se utilizó el software ImageJ. El cual es un programa de código abierto que permite procesar imágenes para análisis científico. En la Figura 3-5 se presentan los resultados del análisis de tamaño de partícula.

Figura 3-5. Análisis de tamaño de Partícula para la Ceniza volante y Escoria de Alto horno

a. Imagen C.V obtenida del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)	b. Imagen E.A.H obtenida del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)
	
c. Imagen C.V Procesada mediante Software ImageJ	d. Imagen E.A.H Procesada mediante Software ImageJ
	
e. Determinación Tamaño partícula de la C.V	f. Determinación Tamaño partícula de la E.A.H
	

La Tabla 3-4 se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis del tamaño de partícula ya mencionado. El tamaño de partícula es un parámetro que se puede asociar a la reactividad del material. A menor tamaño de partícula mayor puede ser su reactividad.

Tabla 3-4. Tamaño promedio de Partícula a partir de Análisis en el Software ImageJ.

Material	Tamaño Promedio (μm)
Ceniza Volante	20.84
Escoria de Alto Horno.	11.6

3.2 Arena.

Con el objetivo de centrar la investigación en el comportamiento de los materiales cementantes (ceniza volante y escoria de alto horno) en el mortero, se decidió utilizar una arena de gradación controlada y con bajo contenido de material fino. Se seleccionó la arena de referencia 20-30**. En el Anexo A se presenta la ficha técnica del material utilizado.

3.3 Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio.

Debido a que el objetivo principal de la investigación es buscar una aplicación práctica para las mezclas activadas alcalinamente, se decidió realizar la investigación utilizando productos químicos de aplicación industrial, los cuales presentan un costo de adquisición menor a los productos químicos analíticos. La Figura 3-6 y Figura 3-7 muestran las presentaciones comerciales del Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio respectivamente.

En el Anexo A se presenta la ficha técnica de los productos químicos utilizados en el desarrollo de la investigación.

** La arena es comercializada por la empresa Arenas Silíceas SAS

Figura 3-6. Hidróxido de Sodio (NaOH) utilizado en la investigación. Elaboración Propia.



Figura 3-7. Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) utilizado en la investigación. Elaboración Propia.



4.Desarrollo Experimental

El desarrollo experimental de la investigación se dividió en cuatro fases principales con el objetivo de obtener una mezcla que garantizara un comportamiento mecánico adecuado y que pudiese ser utilizada para la fabricación de unidades de mampostería estructural. A continuación se describe el alcance y los resultados obtenidos en cada una de las fases de la investigación.

4.1 Fase I. Estudio del Material Cementante.

Durante el desarrollo de la Fase 1 de la investigación se realizaron ensayos para establecer la combinación de Ceniza volante y Escoria de alto horno adecuada para ser utilizada como material cementante. De manera simultánea se estableció la solución alcalina adecuada para generar el mayor desempeño mecánico del mortero.

Para cumplir con estos dos objetivos de la Fase 1, se desarrolló la siguiente metodología experimental.

4.1.1 Combinaciones de Material Cementante

Se estudiaron 4 combinaciones de ceniza y escoria. Como se mencionó previamente, la consecución de la escoria de alto horno fue un aspecto crítico para el desarrollo de la investigación, por lo tanto, las combinaciones de ceniza y escoria están planteadas como un reemplazo de escoria de alto horno por la ceniza volante con el objetivo de optimizar el uso de la escoria de alto horno.

La Tabla 4-1 muestra las combinaciones de material cementante utilizadas para el desarrollo de la Fase 1 de la investigación. Los porcentajes establecidos para cada una de las combinaciones se establecieron con el objetivo de optimizar la cantidad de Escoria de Alto Horno disponible.

Tabla 4-1. Combinaciones de Material cementante estudiadas.

COMBINACIONES CEMENTANTE					
		PORCENTAJE ESCORIA			
PORCENTAJE CENIZA		0%	20%	40%	60%
	40%				C4
	60%			C3	
	80%		C2		
	100%	C1			

4.1.2 Solución Alcalina

La solución alcalina utilizada durante la investigación estuvo compuesta a base de Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na_2SiO_3). Durante la Fase 1 se estudió la influencia de la concentración del NaOH y de la relación entre el Silicato de Sodio y el Hidróxido de Sodio en el comportamiento mecánico de la mezcla activada. Para ello, se estudiaron las siguientes variantes de la solución alcalina.

Tabla 4-2. Combinaciones de Solución Alcalina estudiadas.

COMBINACIONES SOLUCIÓN ALCALINA				
		Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$		
		0.5	1	1.5
Concentración Molar NaOH	[6M]	S1	S2	S3
	[8M]	S4	S5	S6
	[10M]	S7	S8	S9

De acuerdo a lo presentado en la Tabla 4-2, se estudiaron 9 combinaciones de la solución alcalina.

Para cada una de las combinaciones de mezcla presentadas en la Tabla 4-1 se estudió su comportamiento bajo la influencia de las soluciones alcalinas presentadas en la Tabla 4-2. Dicho estudio se realizó utilizando cubos de mortero de 5cm de arista.

En la Tabla 4-3 se presentan las cantidades de material por cada 100 gramos de material cementante para las 36 mezclas estudiadas en la Fase 1. Para la elaboración de mortero se utilizó una relación Arena/Cementante de 2.25 y una relación Solución Alcalina/Cementante (SA/CM) de 0,55.

Para cada una de las mezclas se elaboraron 3 cubos de mortero para un total de 108 cubos de mortero. Los cubos se cubrieron con papel plástico y se dejaron curando al ambiente durante 7 días. Posterior a esta fecha se realizó el ensayo a compresión.

A continuación se presenta la descripción de la convención utilizadas para la designación de cada una de las diferentes mezclas estudiadas.

C1-8M-0.5

C1: Combinación de Cementante. Ver Tabla 4-1

8M: Concentración solución Hidróxido de Sodio (NaOH).

0.5: Relación Silicato de Sodio/ Hidróxido de Sodio (Na_2SiO_3 / NaOH). Ver Tabla 4-2

Tabla 4-3. Tipos de Mezclas y Cantidades de Material para las mezclas estudiadas.

No.	DESIGNACIÓN	COMBINACIÓN CEMENTANTE	CONCENTRACIÓN NaOH	RELACIÓN SILICATO/NaOH	ESCORIA (g)	CENIZA (g)	ARENA (g)	RELACIÓN SA/C	Solución NaOH (g)	SILICATO (g)
1	C1-6M-0.5	C1	6M	0.5	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	6.6
2	C1-6M-1	C1	6M	1.0	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	13.2
3	C1-6M-1.5	C1	6M	1.5	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	19.8
4	C1-8M-0.5	C1	8M	0.5	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	8.8
5	C1-8M-1	C1	8M	1.0	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	17.6
6	C1-8M-1.5	C1	8M	1.5	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	26.4
7	C1-10M-0.5	C1	10M	0.5	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	11
8	C1-10M-1	C1	10M	1.0	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	22
9	C1-10M-1.5	C1	10M	1.5	0.00	100.00	225.00	0.55	55.00	33
10	C2-6M-0.5	C2	6M	0.5	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	6.6
11	C2-6M-1	C2	6M	1.0	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	13.2
12	C2-6M-1.5	C2	6M	1.5	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	19.8
13	C2-8M-0.5	C2	8M	0.5	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	8.8
14	C2-8M-1	C2	8M	1.0	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	17.6
15	C2-8M-1.5	C2	8M	1.5	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	26.4
16	C2-10M-0.5	C2	10M	0.5	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	11
17	C2-10M-1	C2	10M	1.0	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	22

No.	DESIGNACIÓN	COMBINACIÓN CEMENTANTE	CONCENTRACIÓN NaOH	RELACIÓN SILICATO/NaOH	ESCORIA (g)	CENIZA (g)	ARENA (g)	RELACIÓN SA/C	Solución NaOH (g)	SILICATO (g)
18	C2-10M-1.5	C2	10M	1.5	20.00	80.00	225.00	0.55	55.00	33
19	C3-6M-0.5	C3	6M	0.5	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	6.6
20	C3-6M-1	C3	6M	1.0	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	13.2
21	C3-6M-1.5	C3	6M	1.5	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	19.8
22	C3-8M-0.5	C3	8M	0.5	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	8.8
23	C3-8M-1	C3	8M	1.0	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	17.6
24	C3-8M-1.5	C3	8M	1.5	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	26.4
25	C3-10M-0.5	C3	10M	0.5	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	11
26	C3-10M-1	C3	10M	1.0	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	22
27	C3-10M-1.5	C3	10M	1.5	40.00	60.00	225.00	0.55	55.00	33
28	C4-6M-0.5	C4	6M	0.5	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	6.6
29	C4-6M-1	C4	6M	1.0	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	13.2
30	C4-6M-1.5	C4	6M	1.5	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	19.8
31	C4-8M-0.5	C4	8M	0.5	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	8.8
32	C4-8M-1	C4	8M	1.0	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	17.6
33	C4-8M-1.5	C4	8M	1.5	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	26.4
34	C4-10M-0.5	C4	10M	0.5	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	11
35	C4-10M-1	C4	10M	1.0	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	22
36	C4-10M-1.5	C4	10M	1.5	60.00	40.00	225.00	0.55	55.00	33

4.1.3 Procedimiento de Mezcla.

Se realizó un procedimiento de mezcla controlado para las diferentes combinaciones planteadas en la Tabla 4-3. El procedimiento de mezcla se realizó mediante una mezcladora planetaria y se compuso de los siguientes pasos:

a. Preparación de la Solución Alcalina.

De acuerdo a la concentración del NaOH y de la relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ seleccionada se preparó la solución alcalina. Las cantidades de materiales requeridos tanto para el NaOH como para el Na_2SiO_3 requeridas para cada una de las 36 mezclas estudiadas se presentan en la Tabla 4-3.

b. Homogenización de cementantes y solución alcalina.

Se realizó un proceso de homogenización de los materiales cementantes (Ceniza Volante y Escoria de Alto Horno) junto con la solución Alcalina (NaOH y Na_2SiO_3). Este proceso se realizó en la mezcladora planetaria durante un tiempo de 2 minutos a velocidad baja.

c. Adición de la Arena.

Trascurridos los 2 minutos requeridos para la homogenización y sin detener la mezcladora, se realizó la adición gradual de la arena. Se mantuvo la mezcladora a velocidad baja durante 2 minutos adicionales.

d. Mezclado final.

Posterior a la adición de la arena y trascurridos los 2 minutos, se detuvo la mezcladora planetaria y se incorporó la mezcla adherida en las paredes de la mezcla y se reinició el proceso de mezcla durante 2 minutos adicionales a velocidad intermedia. Finalizado el proceso, se procedió a la fundida de los cubos.

4.1.4 Resultados Fase I

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la Fase 1 de la investigación. Los resultados obtenidos en esta Fase se relacionan con el comportamiento del material activado alcalinamente en cuanto a la resistencia a la compresión.

Los resultados presentados en la **Figura 4-1** muestran la influencia del silicato de sodio en la resistencia a la compresión de las mezclas activadas alcalinamente. En todas las combinaciones de material cementante estudiadas, se presentó un aumento en la resistencia a la compresión pasando de una relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 0,5 a 1.

Se observa que la Combinación C1 (100% ceniza volante) presenta los menores resultados de resistencia a la compresión. Lo cual indica que la escoria de alto horno presenta un potencial de activación alcalina mayor al de la ceniza volante, tal como se observa en los resultados de resistencia para la Combinación C4 (40% Ceniza-60% Escoria) en la cual se alcanzó la mayor resistencia a la compresión.

A partir de los resultados presentados en la Figura 4-1 se construyó una gráfica consolidada que permitió establecer las mezclas y la concentración de la solución alcalina que presentaban los mejores resultados de resistencia a la compresión.

Los resultados consolidados se presentan en la Figura 4-2. A partir del análisis de los resultados se seleccionaron 3 mezclas para ser analizadas y optimizadas. Las 3 mezclas seleccionadas son:

- **C4-1.5-6M**
- **C3-1.5-6M**
- **C4-0.5-10M**

A las tres mezclas seleccionadas se les realizó el ensayo de fluidez para morteros utilizando la mesa de flujo con el objetivo de medir la trabajabilidad de las mezclas. Adicionalmente se realizaron nuevos cubos de mortero los cuales fueron curados a diferentes temperaturas durante 24 horas. Los resultados del proceso de optimización y selección de la Mezcla de mejor desempeño mecánico se presentan en la Sección 4.2.

Figura 4-1. Resultados Resistencia a la Compresión para las diferentes combinaciones de Cementante.

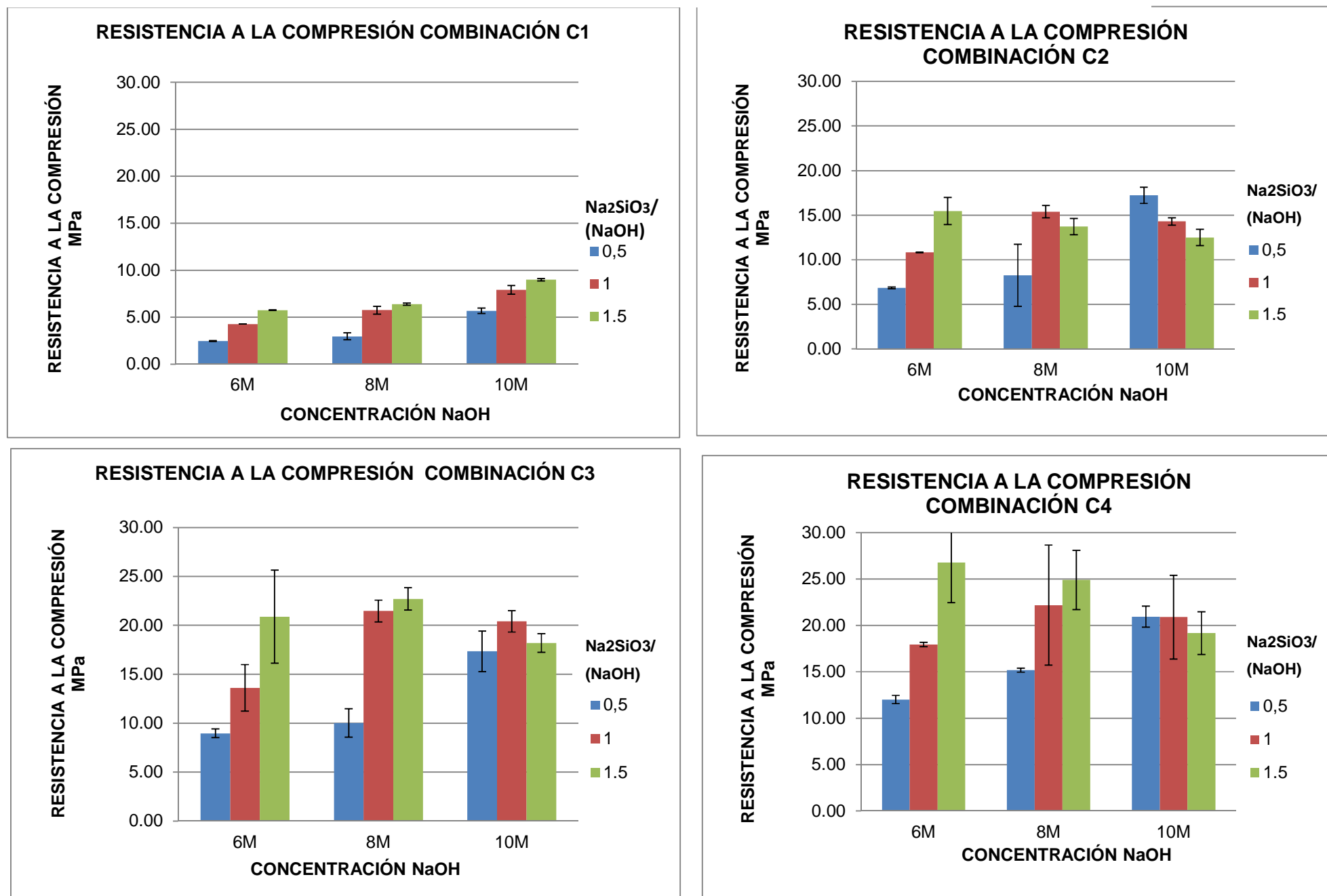
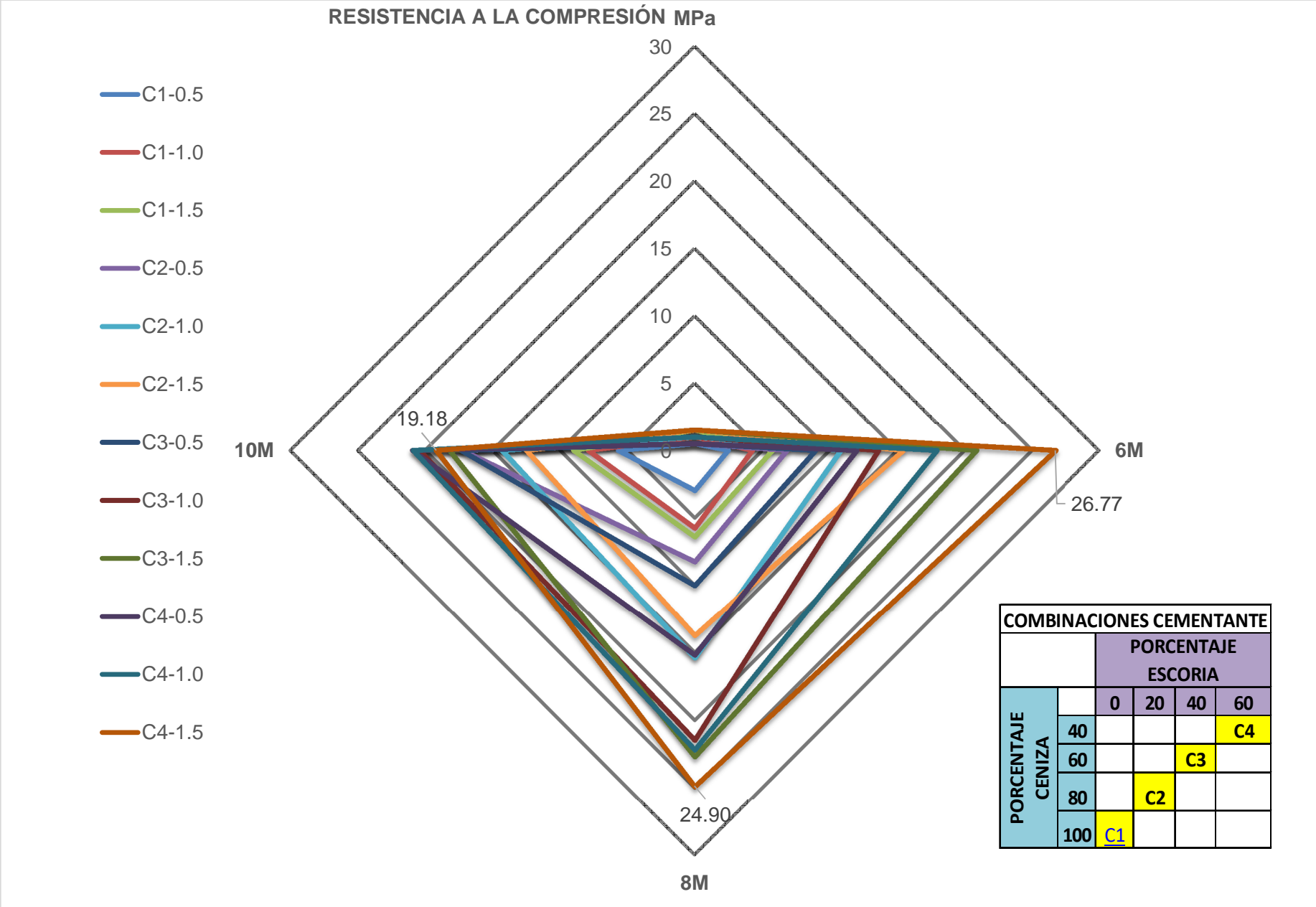


Figura 4-2. Resultados consolidados de Resistencia a la Compresión para las diferentes combinaciones de Cementante.



4.2 Fase II. Selección Mezcla de mejor desempeño mecánico

El proceso de selección de la mezcla de mejor desempeño mecánico se realizó a partir de los resultados de los ensayos de fluidez y del análisis de la resistencia a la compresión, de las tres mezclas seleccionadas previamente (**C4-1.5-6M**, **C3-1.5-6M**, **C4-0.5-10M**), ante un proceso de curado a diferentes condiciones de temperatura.

4.2.1 Ensayo de Fluidez

El Ensayo de Fluidez se realizó bajo los lineamientos de la NTC 111 “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO PARA DETERMINAR LA FLUIDEZ DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO. (ASTM C 230)”. Ver Figura 4-3.

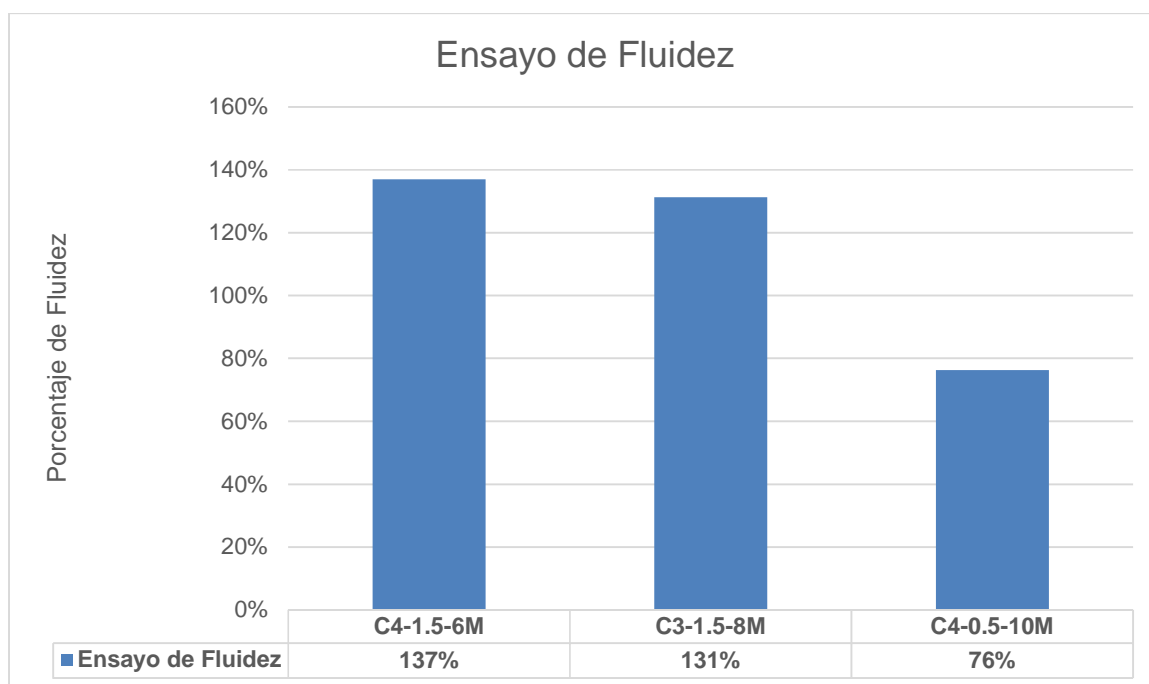
Figura 4-3. Mezcla de mortero activado alcalinamente sobre mesa de flujo.



El ensayo de fluidez realizado sobre las mezclas seleccionadas se realizó 5 minutos después de finalizado el proceso de mezcla del mortero. Pasado este tiempo, se llevó la mezcla a la mesa de flujo con el objetivo de analizar la pérdida de trabajabilidad de la mezcla con el tiempo, lo anterior debido a que durante la Fase 1 de la investigación se evidenció que las diferentes mezclas adquirían resistencia rápidamente, lo cual se traduciría en una pérdida de trabajabilidad.

En la Figura 4-4 se presentan los resultados del ensayo de fluidez realizado a las mezclas. Aunque los resultados de fluidez para las mezclas **C4-1.5-6M** y **C3-1.5-8M** parecen ser altos para los valores comunes del mortero fabricado a partir de cemento portland (alrededor del 105%) se deben analizar estos valores desde el punto de vista de la rápida ganancia de resistencia de la mezcla y de la consecuente pérdida de trabajabilidad.

Figura 4-4. Resultados ensayo de Fluidez.

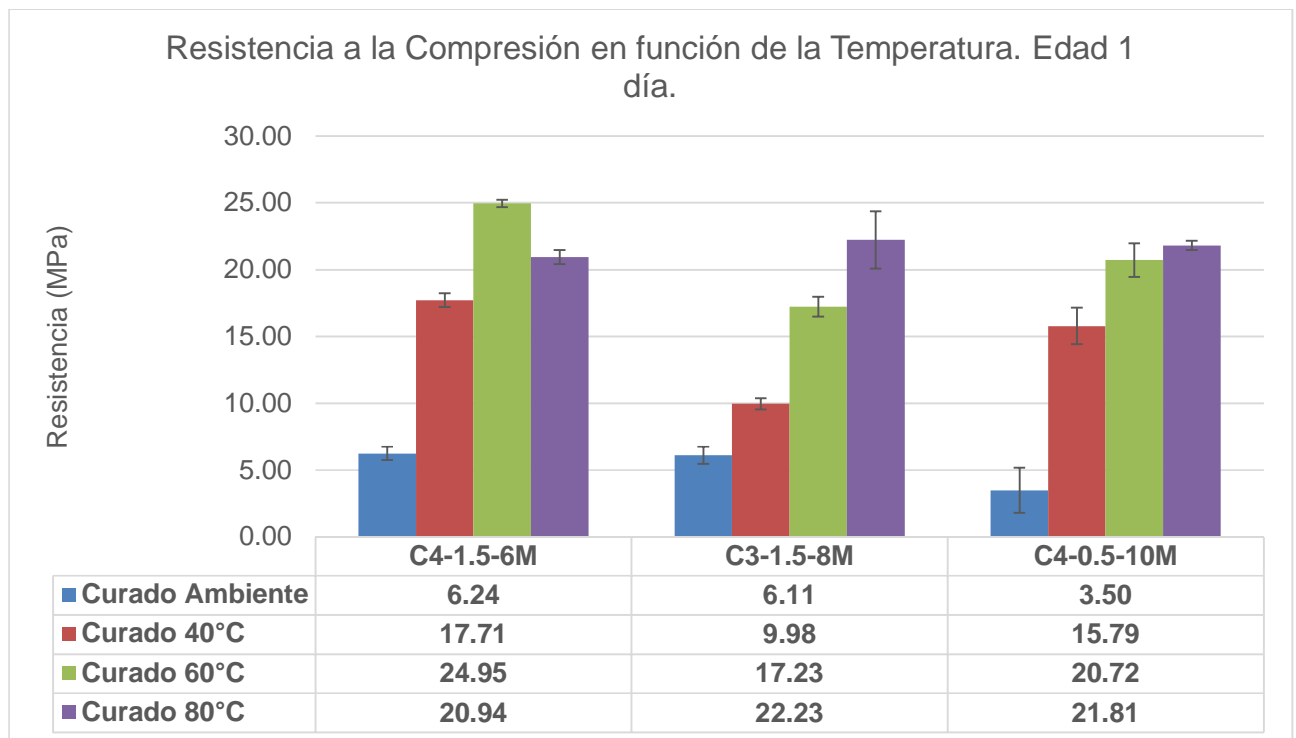


4.2.2 Efecto de la Temperatura.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, las mezclas activadas alcalinamente requieren un curado en temperatura para optimizar el proceso de reacción entre la solución alcalina y el material silicoaluminosos. Para analizar los efectos de la temperatura sobre las mezclas seleccionadas, se realizaron 12 cubos de mortero para cada una de estas mezclas y se sometieron a un proceso de curado a temperaturas de 23 °C (Temperatura ambiente), 40 °C, 60°C y 80°C durante un periodo de 24 horas. Pasadas las 24 horas, los cubos fueron sometidos al ensayo de resistencia a la compresión. De igual manera, se realizó una comparación entre las mezclas seleccionadas en función de la densidad, comparando este parámetro en las probetas curadas al ambiente y las probetas curadas en temperatura.

La Figura 4-5 presenta los resultados de resistencia a la compresión en función de la temperatura de curado. Se evidencia un efecto notable de la temperatura de curado sobre la resistencia de las mezclas de mortero. En algunos casos el aumento de la resistencia se encuentra por encima del 500% en comparación con las probetas de mortero curadas a temperatura ambiente.

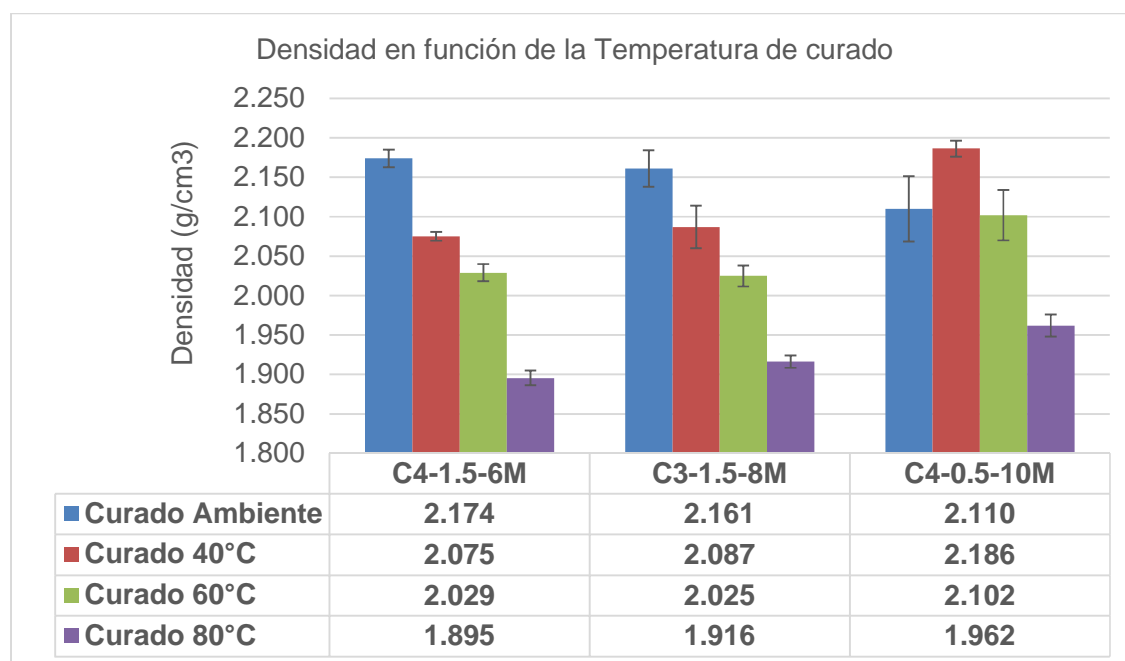
Figura 4-5. Resistencia a la compresión en función de la temperatura de curado.



La Figura 4-6 muestra los resultados de la densidad de las mezclas de mortero activado en función de la temperatura de curado. Se observa que una relación directa entre la temperatura de curado, la densidad y la resistencia. Se estableció que la temperatura

genera una disminución notable de la densidad del mortero pero un aumento considerable en la resistencia.

Figura 4-6. Densidad en función de la temperatura de curado.



A partir de los resultados presentados en la Figura 4-5 y Figura 4-6, se correlacionaron los resultados para determinar la mezcla con la mayor resistencia a la compresión comparada con la densidad obtenida. Los resultados son presentados en la Figura 4-7. Se puede observar que la Mezcla C3-1.5-8M Curada a 80°C presenta la mayor resistencia a la compresión con la menor densidad. En terminos de aplicación a la fabricación de unidades de mampostería, este comportamiento de la Mezcla C3-1.5-8M Curada a 80°C es adecuado en términos constructivos y de aporte de cargas muertas para posibles aplicaciones en la construcción de edificaciones.

En la Figura 4-8 se observa la variación en la estructura interna de las diferentes mezclas en función de la temperatura de curado. A medida que se aumentó la temperatura de curado, se evidencia un aumento en la porosidad del material, lo cual es directamente proporcional a los resultados de densidad previamente mencionados. El aumento en la porosidad y la disminución de la densidad se entienden como un incremento en la reacción química entre el material cementante y la solución alcalina.

Se pudo establecer que, adicional a efectos de la temperatura sobre la resistencia a la compresión y densidad, el curado bajo diferentes temperaturas influye directamente en la estabilidad de la mezcla y de la probeta. En este sentido se encontró que las mezclas a las cuales se les realizó curado en temperatura no se desintegran fácilmente mientras que aquellas que son curadas al ambiente presentan menor cohesión.

De acuerdo a lo anterior, se determinó que la mezcla con mayor estabilidad, posterior al curado, fue la mezcla C3-1.5-8M Curada a 80°C.

Figura 4-7. Relación Densidad Vs Resistencia para diferentes temperaturas de curado.

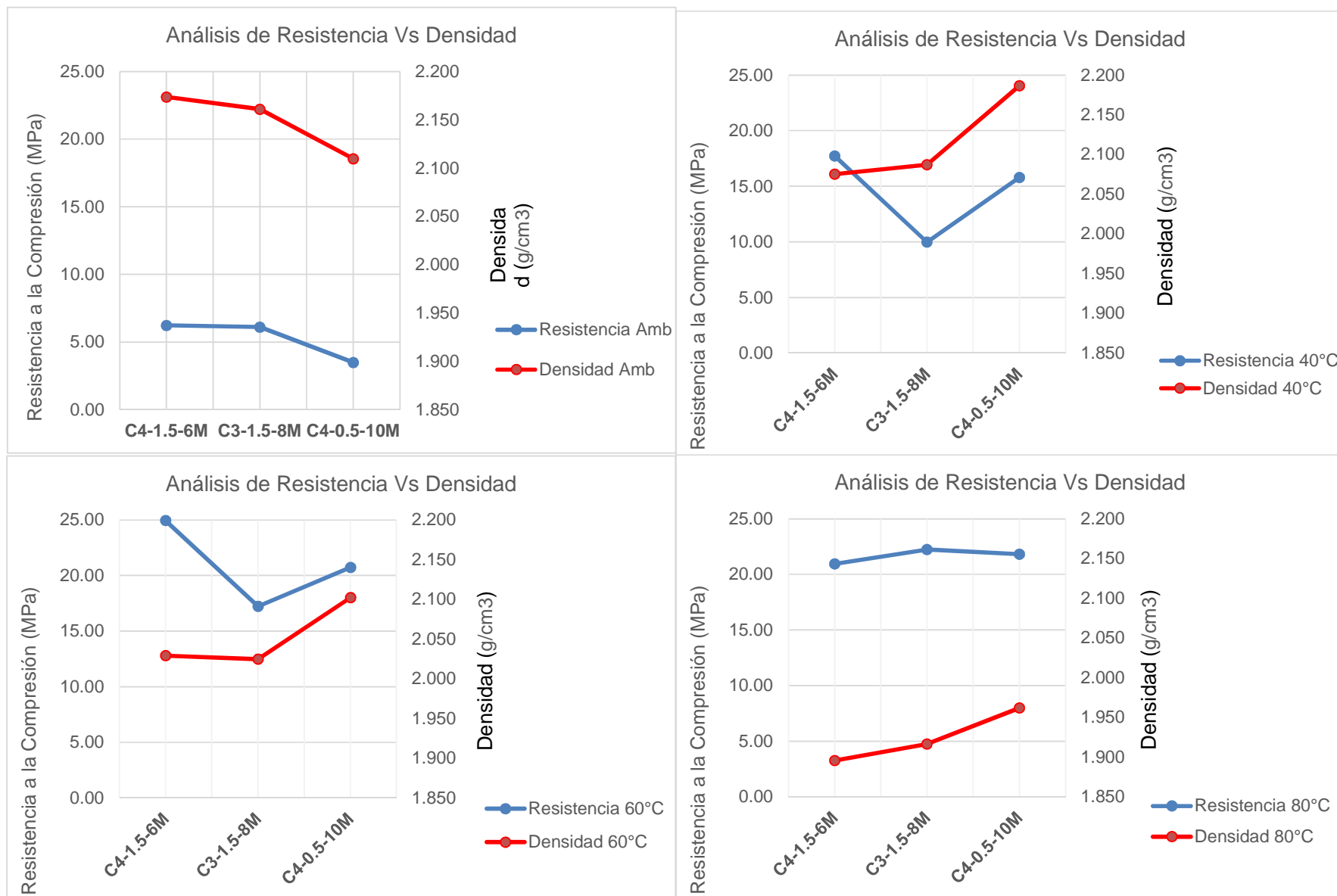


Figura 4-8. Cambios internos en la Mezcla en función de la Temperatura de Curado.

C4-1.5-6M			
			
Curado Ambiente	Curado 40°C	Curado 60°C	Curado 80°C
C3-1.5-8M			
			
Curado Ambiente	Curado 40°C	Curado 60°C	Curado 80°C
C4-0.5-10M			
			
Curado Ambiente	Curado 40°C	Curado 60°C	Curado 80°C

4.2.3 Selección Mezcla de mejor desempeño mecánico.

Aunque la resistencia a la compresión es un parámetro importante para la determinación de la mezcla de mejor desempeño mecánico, se buscaron parámetros adicionales para seleccionar dicha mezcla. Se realizaron ensayos de fluidez y densidad y se analizó la cohesión de la mezcla.

El parámetro o aspecto que finalmente fue definitivo para la selección de la mezcla fue el relacionado con la cohesión de la mezcla posterior al curado. Este parámetro está relacionado con la adherencia que se presenta entre el agregado utilizado y la mezcla activada alcalinamente. Se pudo observar y determinar que la mezcla que presenta un comportamiento adecuado posterior al curado es la Mezcla **C3-1.5-8M** Curada a **80°C**. Ver la Figura 4-8. Se decidió continuar la siguiente fase de la investigación utilizando esta mezcla.

A continuación se presenta el resumen de las propiedades estudiadas para esta mezcla.

Tabla 4-4. Resumen de Propiedades Mezcla **C3-1.5-8M** Curada a **80°C**

Propiedad	Resultado	Observación
Fluidez	131%	Ver Figura 4-4
Resistencia a la Compresión	22.23 MPa	Ver Figura 4-5
Densidad	1.916 g/cm ²	Ver Figura 4-6
Estabilidad de Mezcla	Adecuada	Ver Figura 4-8

4.3 Fase III. Estudio de la Mezcla de mejor desempeño mecánico.

Una vez seleccionada la mezcla de mejor desempeño mecánico, se procedió a realizar un ensayo en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), con el objetivo de estudiar y analizar la microestructura de la mezcla **C3-1.5-8M**. Se analizó dicha mezcla y sus cambios bajo los diferentes ambientes de curado.

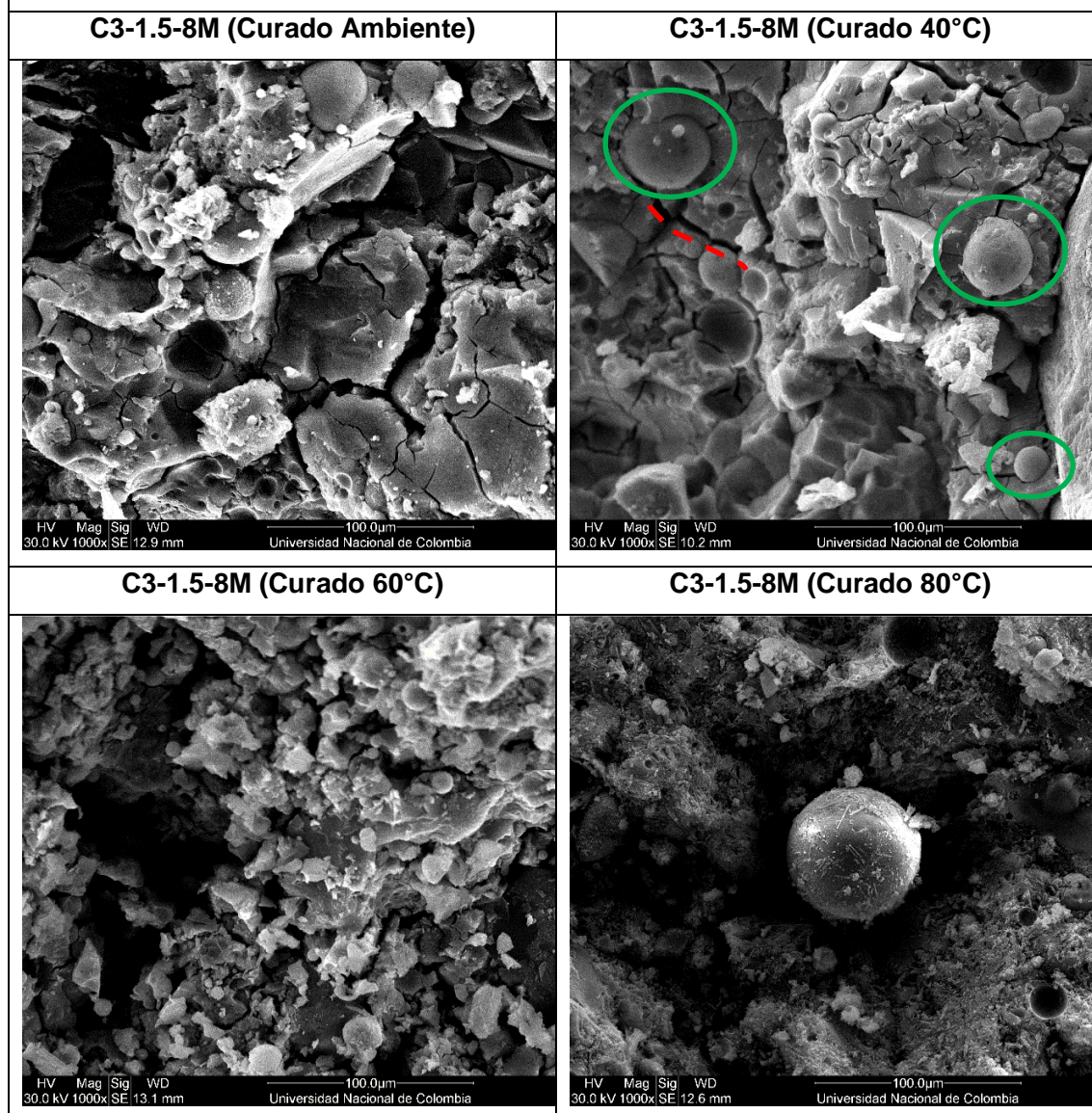
4.3.1 Resultados Ensayo SEM

Los resultados obtenidos del ensayo SEM se presentan en la Figura 4-9. Se puede observar que el ambiente de curado afecta la microestructura de la mezcla. Por ejemplo a medida que la temperatura de curado aumenta, disminuye la cantidad de partículas de ceniza volante sin reaccionar. El curado a temperaturas por encima de los 60°C ayuda a la conformación de una microestructura mas compacta lo cual se ve reflejado en los resultados de resistencia a la compresión.

Se puede observar que la mezcla de mejor desempeño mecánico seleccionada, C3-1.5-8M curado a 80°C, aunque aún continene partículas de ceniza volante sin reaccionar, presenta una estructura mucho mas homogénea y compacta en comparación con las mezclas curadas a temperaturas inferiores.

Lo anterior se relaciona con la cohesión de la mezcla mencionada en la sección anterior y la cual fue un parámetro importante para la selección de la mezcla de mejor desempeño mecánico.

Figura 4-9. Microestructura de la Mezcla de mejor desempeño mecánico seleccionada bajo diferentes ambientes de curado.



Se observa como la temperatura de curado genera cambios en la microestructura de la mezcla. La probetas **C3-1.5-8M** curadas al ambiente y a 40°C presentan mayor cantidad de partículas de ceniza volante sin reaccionar (circunferencia verde) y mayor numero de microfisuras (línea roja) si se compara con las probetas **C3-1.5-8M** curadas a 60°C y 80°C.

4.3.2 Comportamiento de la Resistencia a la Compresión con el tiempo.

Seleccionada la mezcla de mejor desempeño mecánico (C3-1.5-8M curada a 80°C), se realizó un estudio del comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la edad de las probetas. El estudio se realizó mediante la fabricación de cubos de 5cm de arista con la Mezcla de mejor desempeño mecánico seleccionada. Todos los cubos fueron curados a 80°C durante un periodo de tiempo de 24 horas y posterior a esto se colocaron las probetas en un ambiente seco con el objetivo de estudiar la variación de la resistencia con el tiempo después del proceso de curado. Ver Figura 4-10.

Figura 4-10. Probetas C3-1.5-8M en ambiente seco posterior al curado a 80°C durante 24 horas.

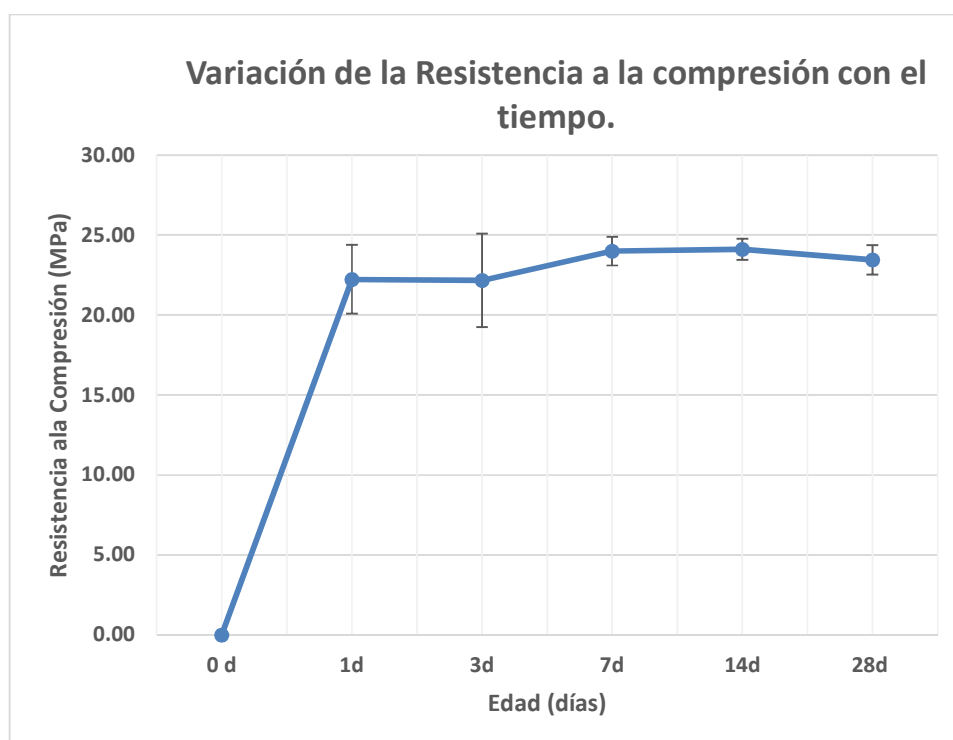


Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión una vez finalizado el proceso de curado a 80°C (24 horas), a los 3 días, 7 días, 14 días y 28 días. Los resultados obtenidos son presentados en la Figura 4-11.

Los resultados del ensayo dejan ver que el proceso de curado es un factor determinante para la resistencia de la mezcla. Se encontró que una vez finalizado el proceso de curado por 24 horas, la mezcla adquiere una resistencia a la compresión cercana a los 22 MPa. Alrededor del día 7, la resistencia alcanza su valor máximo de 24 MPa aproximadamente. Posterior al día 7, la resistencia a la compresión se mantiene constante sin mayores variaciones.

Los resultados presentados en la Figura 4-11. permiten evidenciar la importancia de la temperatura de curado en el proceso de ganancia de resistencia a la compresión. De igual manera se aprecia como gran parte de la resistencia a la compresión la adquiere la mezcla en los primeros días posterior a la fundida.

Figura 4-11. Variación de la resistencia a la compresión en función de la edad de las probetas.



Una vez finalizada la Fase III del desarrollo experimental, en la cual se seleccionó la mezcla C3-1.5-8M, con un proceso de curado a 80°C, como la mezcla de mejor desempeño mecánico para la ejecución de la Fase III de la investigación. La Fase IV de la investigación consistió en la implementación de la mezcla de mejor desempeño mecánico en la fabricación de unidades de mampostería estructural.

4.4 Fase IV. Fabricación Unidades de Mampostería.

Las características de las mezclas activadas alcalinamente encontradas durante el desarrollo de la Fase 1 y Fase 2 de la investigación, evidenciaron que dichas mezclas presentan un gran potencial de implementación en la fabricación de elementos de construcción prefabricados, debido a la necesidad de realizar curado con temperaturas por encima de la temperatura ambiente y al desarrollo de resistencia a edades tempranas.

Basados en los resultados anteriores, se implementó la mezcla C3-1.5-8M con un proceso de curado a 80°C, como materia prima para la fabricación de unidades de mampostería.

4.4.1 Características Unidades de Mampostería.

De acuerdo a la NSR-10 Sección D.3.6.1, las unidades de mampostería utilizadas para la construcción de elementos en mampostería estructural pueden estar fabricadas en concreto, arcilla cocida, piedra o unidades silico-calcareas. En función de la geometría, dichas unidades pueden dividirse en unidades de perforación vertical (UPV), perforación horizontal o maciza.

Aunque el material objeto de la presente investigación se asemeja a un mortero convencional, no cumple a cabalidad con las características de los materiales

especificados por la NSR-10. Sin embargo, se realizaron los ensayos típicos que permiten caracterizar el comportamiento de las unidades de mampostería estructural descritos en la NSR-10. Se decidió trabajar con unidades de perforación vertical (UPV). En la Tabla D.3.6-1 de la NSR-10, ver Figura 4-12, se presentan los espesores mínimos de pared para las UPV.

Figura 4-12. Tabla D.3.6-1 de la NSR-10

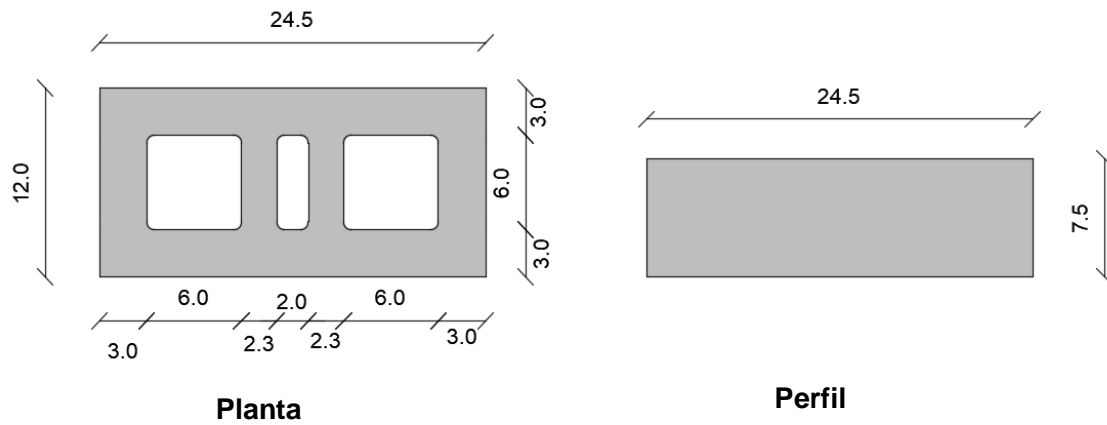
Tabla D.3.6-1
Espesores mínimos de paredes en unidades (bloques)
de mampostería de perforación vertical (mm)

Espesor externo	Espesor mínimo de paredes exteriores		Espesor mínimo de tabiques transversales
nominal	sin perforaciones verticales secundarias	con perforaciones verticales secundarias	sin perforaciones verticales secundarias
80 ⁽¹⁾	20	30	20
100	20	30	20
120	22	32	20
150	25	35	25
200	30	40	25
250	35	45	30
300	40	50	30

Nota ⁽¹⁾: La unidad de 80 mm de espesor externo nominal sólo se permite en muros no estructurales y en las paredes laterales de mampostería de cavidad.

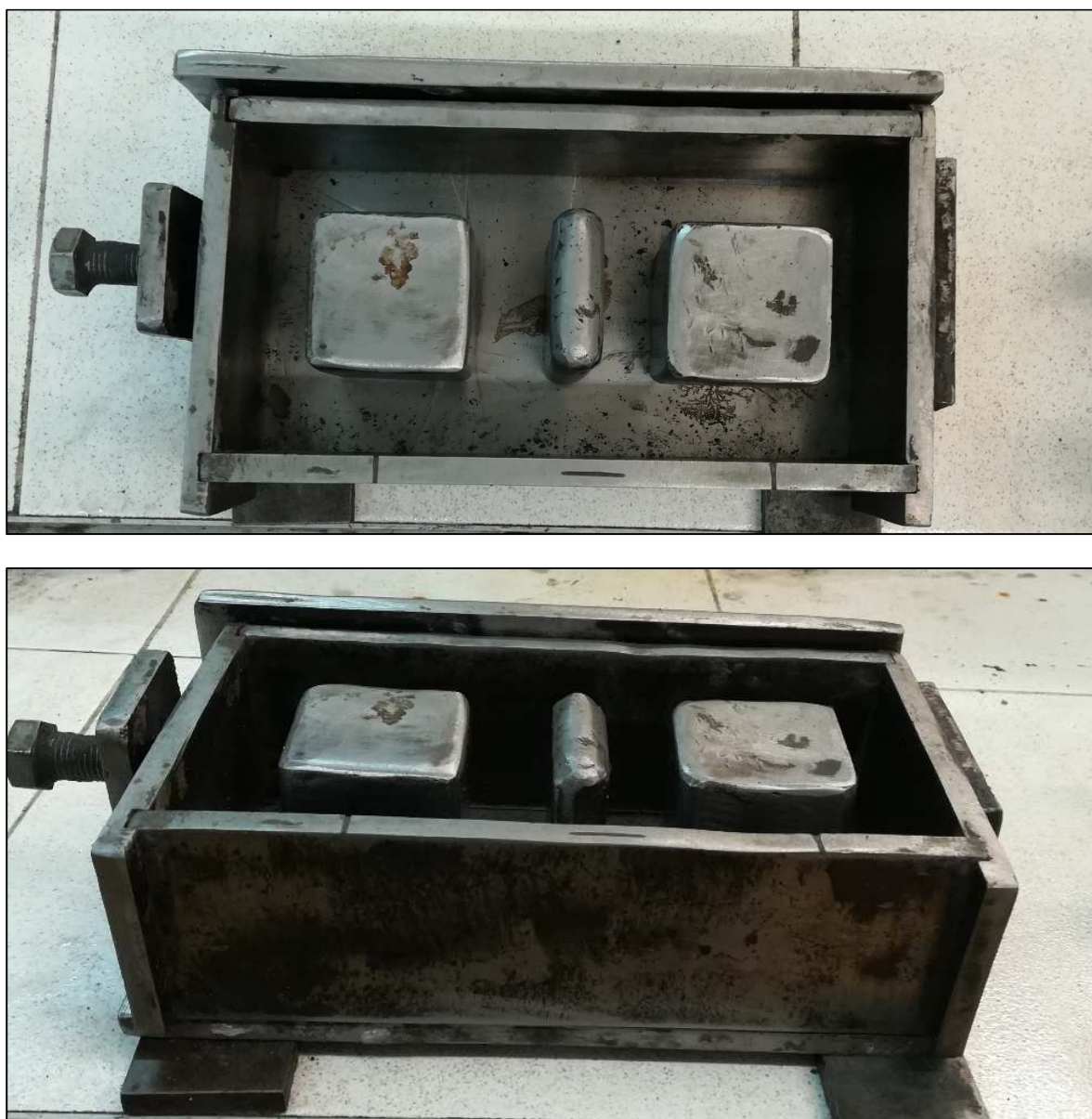
En la Figura 4-13 se presentan las dimensiones de las unidades de mampostería fabricadas durante el desarrollo de la investigación. Las dimensiones establecidas para la UPV cumple con los requisitos de espesor de pared establecidos por la NSR-10.

Figura 4-13. Dimensiones UPV fabricada en la investigación. Unidades en cm



Una vez definidas las dimensiones de la unidad de mampostería se procedió a la fabricación del molde metálico que garantizara las dimensiones previamente establecidas. Se realizaron ensayos sobre moldes de madera, sin embargo dichos moldes no facilitaron el retiro de la muestra posterior a la fundida. En la Figura 4-14 se presenta el molde metálico, diseñado y fabricado durante el desarrollo de la investigación, para la fabricación de las UPV.

Figura 4-14. Molde metálico para la fabricación de las unidades de mampostería.



La configuración del molde permite el retiro individual de los elementos centrales, lo cual facilita el proceso de retiro de la unidad de mampostería posterior a la fundida.

Debido a que la cantidad de material de escoria de alto horno era limitada, se fabricaron 80 unidades de mampostería con las cuales se realizaron los siguientes ensayos:

- Absorción.
- Resistencia a la compresión (Unidad)
- Resistencia a la compresión (Murete)
- Tensión diagonal en murete.

Figura 4-15. Unidad de mampostería fabricada durante el desarrollo de la investigación.



El proceso de fabricación y el uso de los moldes metálicos permite un terminado homogéneo de la unidad de mampostería. Debido a que la mezcla activada alcalinamente es similar al comportamiento de un mortero convencional, durante el proceso de fabricación de las unidades se garantizó una adecuada vibración de la mezcla.

5. Ensayos de Caracterización Unidades de Mampostería.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados a partir de las unidades de mampostería fabricadas. Es necesario resaltar que la cantidad de las materias primas cementantes disponibles fue un limitante para la cantidad de unidades de mampostería que se fabricaron.

5.1 Ensayo de Densidad Unidad de Mampostería.

El ensayo de densidad se realizó siguiendo los lineamientos de la NTC 4024. El volumen de la unidad de mampostería se calcula con la ecuación Ec.5-1:

$$V = \frac{Masa_{Saturada\ 24h} - Masa_{Sumergida}}{1000} \quad (m^3) \quad \text{Ec. 5-1}$$

Se realizó el ensayo sobre 3 unidades de mampostería.

Tabla 5-1. Masa saturada y masa sumergida para la unidad de mampostería.

Unidad	Masa Saturada (kg)	Masa Sumergida (kg)
Unidad 1	3.335	1.765
Unidad 2	3.251	1.695
Unidad 3	3.264	1.692
Promedio	3.283	1.717

$$V = \frac{3.283 \text{ kg} - 1.717 \text{ kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,001566 \text{ (m}^3\text{)}$$

La densidad se calcula como la relación entre la Masa seca y el volumen.

$$\text{Densidad} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Masa}_{\text{seca}}}{V} \quad \text{Ec. 5-2}$$

Tabla 5-2. Masa seca para la unidad de mampostería.

Unidad	Masa Seca (kg)
Unidad 1	2.991
Unidad 2	2.951
Unidad 3	2.962
Promedio	2.968

$$\text{Densidad} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{2.968 \text{ kg}}{0,001566 \text{ (m}^3\text{)}}$$

$$\text{Densidad} = 1895,27 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Los resultados de densidad de la unidad de mampostería están acordes a los resultados de densidad obtenidos en la Fase 2 de la presente investigación.

De acuerdo a la NTC 4026, las unidades de mampostería de concreto pueden ser clasificadas en función de su densidad. La densidad obtenida para la unidad fabricada durante el desarrollo de esta investigación clasificaría como unidad de Peso Mediano (1680 – 2000 kg/m³)

5.2 Ensayo de Absorción libre de agua.

El ensayo de absorción se realizó siguiendo los requisitos de la NTC 4024.

La absorción se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{\text{Masa}_{\text{Saturada 24h}} - \text{Masa}_{\text{Seca}}}{\text{Masa}_{\text{Seca}}} * 100 (\%) \quad \text{Ec. 5-3}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{3.283 \text{ kg} - 2.968 \text{ kg}}{2.968 \text{ kg}} * 100$$

$$\% \text{ Absorción} = 10,6\%$$

De acuerdo a lo establecido en la NTC4026 para unidades de mampostería en concreto, las unidades de Peso Mediano presentan porcentajes máximos de absorción entre 12% a

15%. El resultado de absorción obtenido para la unidad de mampostería se ajusta al límite establecido por la norma.

5.3 Resistencia a la Compresión de la Mampostería.

De forma similar a los procesos de diseño de estructuras de concreto reforzado, en las cuales se utiliza como parámetro de diseño la resistencia a compresión del concreto (f'_c), las estructuras construidas en mampostería estructural se diseñan a partir de la resistencia a compresión de la mampostería (f'_m). A partir de este parámetro pueden establecerse relaciones para determinar otras propiedades como el módulo de elasticidad, resistencia al corte o a la flexión. Sin embargo es necesario resaltar que las estructuras de mampostería se ven afectadas, en su comportamiento estructural, por aspectos como el curado, la mano de obra o el ambiente al cual se encuentran expuestas.

De acuerdo al Título D de las NSR-10, la resistencia a la compresión de la mampostería puede determinarse por medio de los siguientes procedimientos:

- Por medio de registros históricos.
- Por determinación experimental sobre muretes de prueba.
- Por medio de ensayos sobre materiales individuales.

Debido a la imposibilidad de obtener algún registro histórico para unidades de mampostería fabricadas con materiales activados alcalinamente, se procederá a calcular la resistencia

a la compresión a partir de la experimentación sobre muretes y los ensayos individuales sobre los materiales.

5.3.1 Resistencia a la compresión a partir de ensayo sobre Muretes.

El Capítulo D.3.7.2 indica que los muretes contruidos para determinar la resistencia a la compresión, deben ser elaborados bajo las mismas condiciones en las cuales se va a llevar a cabo su construcción en obra. En este sentido, se deben garantizar aspectos como la calidad en la mano de obra y el contenido de humedad de los materiales.

De acuerdo a la norma, se deben realizar mínimo 3 muretes para evaluar la resistencia a la compresión, garantizando una relación alto/ancho del murete de mínimo 1.5 y máximo 5. Para muretes fabricados a partir de unidades de perforación vertical, el murete debe tener una longitud mínima igual al largo de la unidad de mampostería.

Para la construcción de los muretes se utilizó un mortero de pega Tipo H de acuerdo a la dosificación presentada en la Tabla D.3.4-1 del Título D de la NSR-10.

La Figura 5-1 muestra el proceso de fabricación y curado de los muretes de mampostería. Se realizó un curado durante 28 días mediante la protección del murete por medio de plástico. En la Tabla 5-3 se relaciona las dimensiones de los muretes ensayados

Figura 5-1. Fabricación y curado de muretes de mampostería.



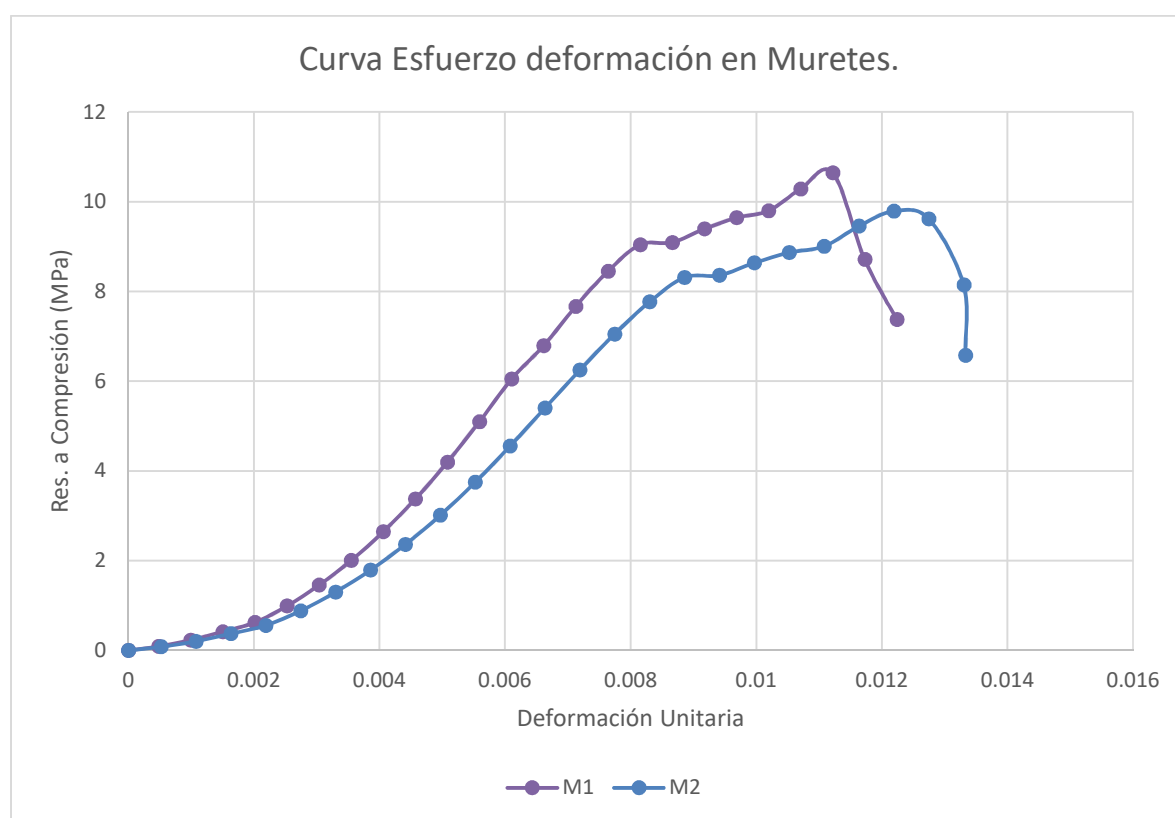
Tabla 5-3. Dimensiones de los Muretes ensayados.

Dimensiones Nominales del Murete			
Largo (cm)	Alto (cm)	Ancho (cm)	Alto/ancho
24	30	12	2.5

Debido a la disponibilidad de material para la fabricación de unidades, solo fue posible la construcción de dos muretes para determinar la resistencia a la compresión. Aunque no se cumple con el requerimiento del Título D de la NSR-10 en relación a la cantidad de muretes, el objetivo principal de este ensayo es poder obtener las bases para el análisis y estudio del comportamiento de unidades de mampostería fabricadas a partir de materiales activados alcalinamente.

Para calcular la resistencia a la compresión de los muretes, se determinó la carga axial máxima que soportaba el murete y se dividió dicha carga en el área transversal del murete, la cual coincide con el área transversal de la unidad de mampostería ($0,0210\text{m}^2$)

Figura 5-2. Curva Esfuerzo Deformación para los Muretes Ensayados.



La Figura 5-2 presenta la curva de esfuerzo deformación para los muretes ensayados. Se evidencia un comportamiento asociado a un material cerámico, en los cuales la falla del material se da súbitamente. La Tabla 5-4 presenta los resultados de resistencia a la compresión de los muretes ensayados.

Tabla 5-4. Resistencia a la Compresión de los Muretes ensayados.

Carga (KN)	Resistencia a la Compresión $f'm$ (Mpa)
205.59	9.79
217.10	10.34
Promedio	10.06

De acuerdo a la sección D.3.7.2.5 del Título D de la NSR-10, los resultados de $f'm$ deben corregirse en función de la relación de esbeltez (Alto/ancho). Los muretes ensayados durante la presente investigación presentan una relación de esbeltez de 2.5. La Tabla 2.3.7-1 de la NSR-10 indica que para una relación de esbeltez de 2.5, la resistencia a la compresión del murete debe multiplicarse por un factor de 1.04, por lo tanto:

$$f'm = 10.06 * 1.04 = \underline{10.46 \text{ MPa}}$$

El valor de $f'm$ obtenido de los ensayos de resistencia a la compresión sobre muretes, corresponderá al valor utilizado en los procesos de diseño en los cuales se utilicen unidades de mampostería de perforación vertical fabricadas con mortero activado alcalinamente.

En la Figura 5-3 se pueden apreciar los mecanismos de falla de los muretes ensayados a compresión. Se puede observar una falla longitudinal en el murete lo cual nos indica una adecuada transmisión de la carga de compresión a través de las diferentes unidades de

mampostería y del mortero de pega que las une. No se aprecia una falla particular en el mortero de pega, lo cual indica una adecuada adherencia entre éste y la unidad de mampostería.

Figura 5-3. Mecanismo de falla muretes mampostería sometidos a compresión.



5.3.2 Resistencia a la Compresión de la mampostería a partir de los ensayos individuales en los materiales.

De acuerdo a D.3.7.5, en los casos en los cuales no se establezca la resistencia a la compresión de la mampostería a partir de resultados históricos o a partir del ensayo de muretes, dicho parámetro puede obtenerse a partir del ensayo individual de cada uno de los materiales que conforman la mampostería.

La resistencia a la compresión de la mampostería obtenida a partir de la calidad de los materiales que la conforman puede obtenerse a partir de las ecuaciones Ec. 5-4 y Ec. 5-5.

$$R_m = \frac{2h}{75+3h} * f'_{cu} + \frac{50k_p}{75+3h} * f'_{cp} \leq 0,8f'_{cu} \quad \text{Ec. 5-4}$$

$$f'_m = 0.75 R_m \quad \text{Ec. 5-5}$$

h: Altura de la Unidad de mampostería, en mm

f'cu: Resistencia a la compresión de la unidad de mampostería, en MPa

f'cp: Resistencia a la compresión del mortero de pega, en MPa

Kp: factor de corrección por absorción de humedad.

Kp=1.4 para unidades de concreto

Kp=0.8 para unidades de arcilla o silico-calcareas.

f'm: Resistencia a la compresión de la mampostería, en MPa

- **Resistencia a la Compresión Unidad de Mampostería.**

De acuerdo a la NTC4026, las unidades de mampostería de concreto se pueden clasificar en función de la resistencia a la compresión como unidades de resistencia alta y unidades de resistencia baja. Las unidades de resistencia alta son aquellas que presentan una resistencia individual superior a 11 MPa y una resistencia del promedio de 3 unidades mínima de 13 MPa. Las unidades de resistencia baja consideran resistencias inferiores a las mencionadas para las unidades de resistencia alta, pero superiores a 7 MPa para ensayos individuales y 8 MPa para el promedio de 3 unidades.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión en unidades de mampostería.

Para realizar el ensayo a compresión fue necesario realizar un proceso de “capinado” de las unidades de mampostería. Lo anterior se realizó con el objetivo de garantizar que la cara superior e inferior de la unidad de mampostería fuese plana.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión fue necesario calcular el área neta de transversal de la unidad de mampostería. De acuerdo a la configuración de la unidad de mampostería presentada en la Figura 4-13, el área transversal neta de la unidad de mampostería corresponde a 210 cm² (0,0210 m²).

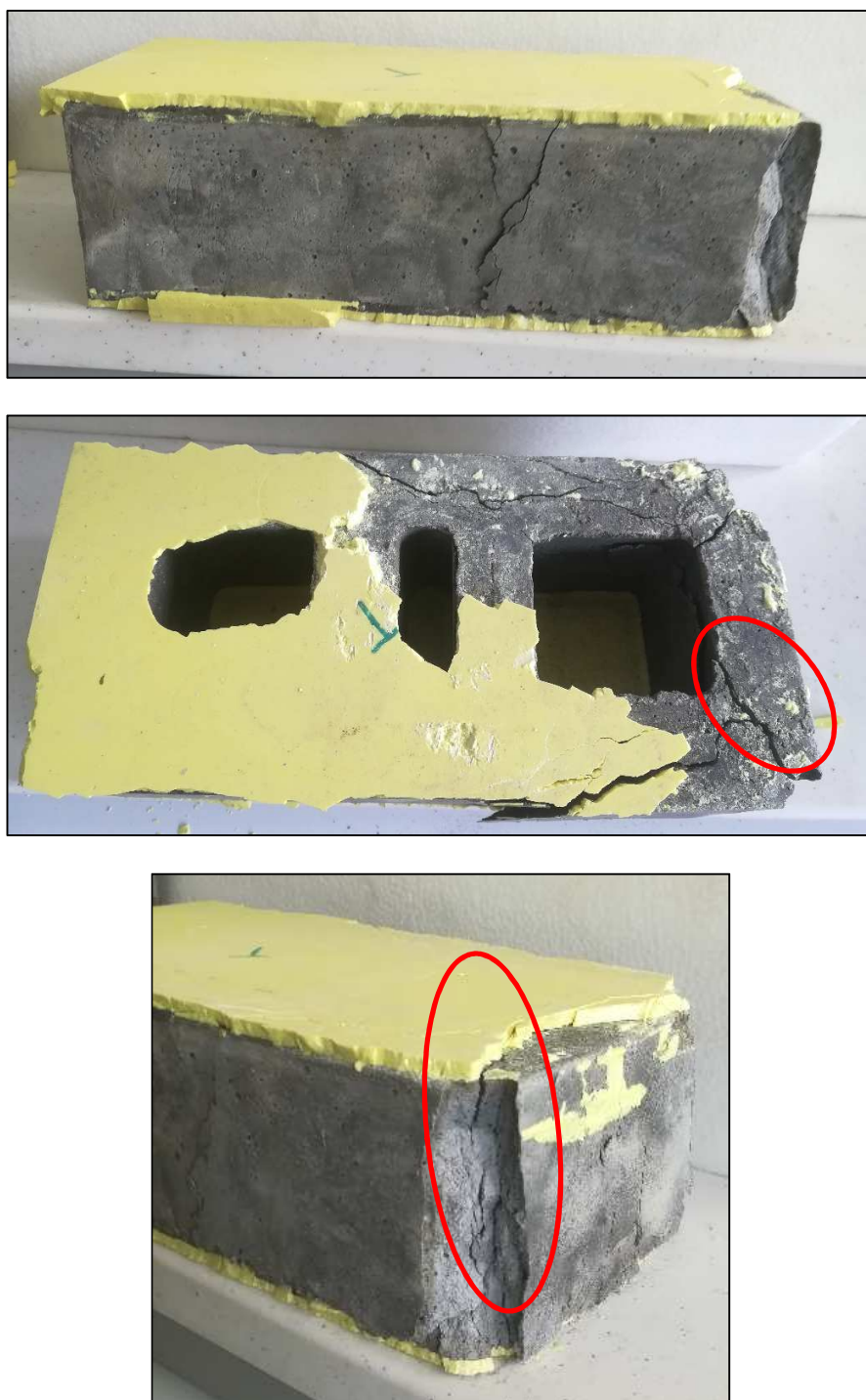
Tabla 5-5. Resistencia a la Compresión Unidades de Mampostería..

Unidad	Carga Axial (KN)	Resistencia a la Compresión Unidad (Mpa)
Unidad 1	285.21	13.58
Unidad 2	233.26	11.11
Unidad 3	250.05	11.91
Promedio (f'_{cu})		12.20

De acuerdo a los resultados obtenidos, la unidad de mampostería puede clasificarse como una unidad de resistencia alta. Los resultados de resistencia a la compresión de unidades de mampostería fabricadas a partir de cementantes activados alcalinamente, muestran que este tipo de materiales, a pesar de no contener cemento portland, presentan un potencial alto de aplicación en términos de su resistencia mecánica.

En la Figura 5-4 se puede observar el mecanismo de falla de las unidades de mampostería durante el ensayo de compresión. Se puede apreciar la falla en las esquinas de la perforación. Dicha falla puede estar asociada a la forma rectangular de la perforación y a una posible concentración de esfuerzos en esta zona.

Figura 5-4. Mecanismo de falla de las unidades de mampostería sometidas a compresión.



- **Mortero de Pega.**

Se trabajó con un mortero de pega Tipo H de acuerdo a la dosificación presentada en la Tabla D.3.4-1 del Título D de la NSR-10. La resistencia a la compresión del mortero de pega se determinó mediante ensayo de resistencia a la compresión en cubos de 5cm de arista.

La resistencia a la compresión del mortero de pega, se determinó a partir el ensayo de 6 cubos de mortero. Los resultados se presentan en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Resistencia a la compresión del mortero de pega.

	Carga axial (KN)	Resistencia (Mpa)
Probeta 1	53.76	21.51
Probeta 2	47.37	18.95
Probeta 3	54.77	21.91
Probeta 4	52.30	20.92
Probeta 5	57.87	23.15
Probeta 6	64.73	25.89
Promedio		22.05

$$f'_{cp} = 22.05 \text{ MPa}$$

La resistencia a la compresión del mortero de pega cumple con los requisitos establecidos por el Título D para un mortero tipo H.

- **Cálculo de la Resistencia a la Compresión de la mampostería.**

A partir de la resistencia a la compresión de la unidad de mampostería y del mortero de pega, se determina la resistencia a la compresión en conjunto de la mampostería.

La altura de la unidad de mampostería, ver Figura 4-13, es de 75 mm

$$h = 75mm$$

El parámetro asociado a la corrección por humedad se tomó igual al establecido en el NSR-10 Título D para unidades de concreto.

$$k_p = 1.4$$

A continuación se calcula el término R_m y el respectivo valor de la resistencia a compresión de la mampostería.

$$R_m = \frac{2h}{75 + 3h} * f'_{cu} + \frac{50k_p}{75 + 3h} * f'_{cp} \leq 0,8f'_{cu}$$

$$R_m = \frac{2 * 75}{75 + 3 * 75} * 12.20 + \frac{50 * 1.4}{75 + 3 * 75} * 22.05 \leq 0,8 * 12.20$$

$$R_m = 11.24 MPa \leq 9.76 MPa$$

$$R_m = 9.76 MPa$$

Finalmente se calcula la resistencia a la compresión de la mampostería:

$$f'_m = 0.75 R_m$$

$$f'_m = 0.75 * 9.76 \text{ MPa}$$

$$f'_m = 7.32 \text{ MPa}$$

Se puede establecer que el método para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería a partir de la calidad de los materiales, es un método conservador, si se compara estos resultados con los obtenidos a partir del ensayo de los muretes.

Debido a que la determinación de la resistencia a la compresión a partir de muretes representa una aproximación más realista al comportamiento final del material, se plantea para las otras evaluaciones del material realizadas en el presente documento, tomar como resistencia a la compresión el valor de $f'_m = \underline{10.46 \text{ MPa}}$

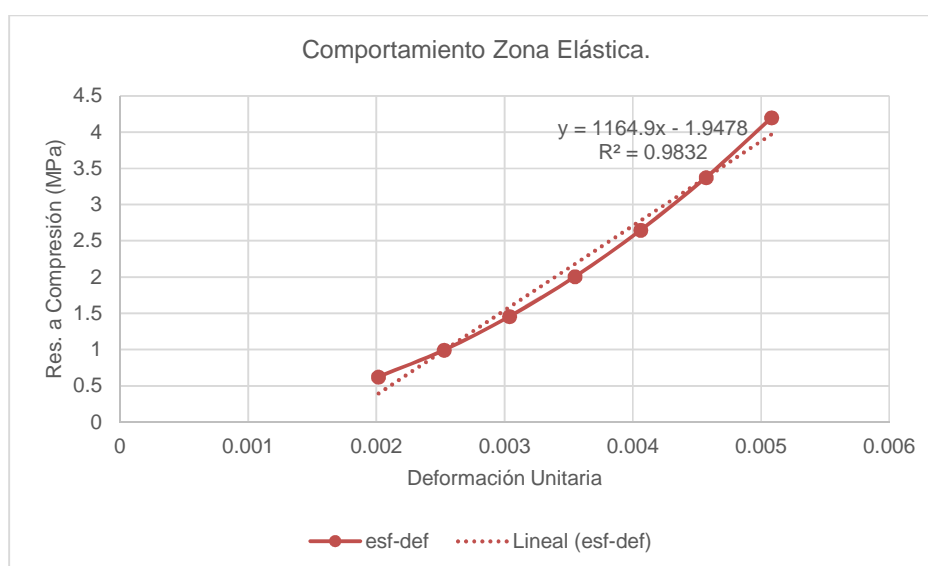
5.3.3 Evaluación del Módulo de Elasticidad aproximado a partir del Ensayo de compresión en Muretes.

A partir de los resultados de compresión en muretes se evaluó el módulo de elasticidad para la mampostería. Es necesario informar al lector que la determinación del módulo de elasticidad presentado a continuación corresponde a una aproximación a dicho parámetro, lo anterior está asociado a que la deformación está calculada en función de los desplazamientos de los platos de equipo de ensayo a compresión. Para determinar de

forma adecuada el módulo de elasticidad se requiere de la implementación de deformímetros en la probeta sometida a compresión durante el desarrollo del ensayo.

De acuerdo a la Sección D.5.2.1.2 el módulo de elasticidad de la mampostería puede obtenerse a partir de la pendiente de la secante para un rango comprendido entre $0.05f'm$ y $0.33f'm$.

Gráfica 5-1. Comportamiento Esfuerzo-Deformación en la Zona Elástica.



De acuerdo a los datos presentados en la Gráfica 5-1 el módulo de elasticidad para la mampostería fabricada a partir de la mezcla activada alcalinamente equivale a $E_m = 1164.9 \text{ MPa}$. De acuerdo a lo establecido por la Norma NSR-10 Título D, para elementos de mampostería contruidos a partir de unidades de concreto, el módulo de elasticidad debe ser igual a $E_m = 900f'm < 20.000 \text{ MPa}$. Teniendo en cuenta que $f'm = 10.46 \text{ MPa}$, se puede evidenciar que el módulo de elasticidad obtenido a partir de los ensayos de laboratorio difieren considerablemente de los valores esperados al aplicar las relaciones establecidas

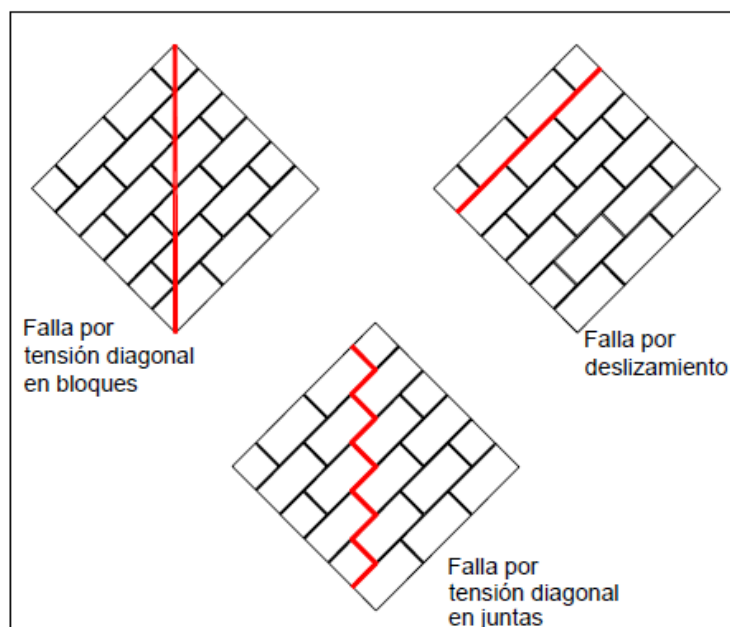
por la NSR-10. Debido a lo anterior, es necesario profundizar en el estudio y análisis del comportamiento mecánico de elementos fabricados a partir de materiales activados alcalinamente.

5.4 Ensayo de Resistencia la Corte. Tracción Diagonal en Muretes.

Se realizó el ensayo de tracción diagonal en muretes, con el fin de caracterizar el comportamiento de las unidades de mampostería fabricadas bajo la acción de este tipo de fuerzas. Para lograr este objetivo, se fabricaron 2 muretes de dimensiones 37x37 cm y se sometieron a cargas sobre la diagonal del murete. Si bien las dimensiones de los muretes construidos no cumplen con las dimensiones establecidas en la NTC 4925, el objetivo del ensayo es aproximarse al comportamiento de elementos estructurales fabricados a partir del material activado alcalinamente estudiado en la presente investigación. El tamaño limitado de los muretes está asociado a la cantidad de unidades de mampostería que fue posible fabricar durante el desarrollo de la investigación.

La Figura 5-5 presenta los posibles mecanismos de falla que se pueden presentar en un elemento sometido a tensión diagonal. Un mecanismo esperado de falla para este ensayo corresponde a una falla por tensión diagonal en bloques, la cual indicaría una adecuada transmisión de cargas entre las diferentes unidades que componen el elemento.

Figura 5-5. Mecanismo de falla en muretes sometidos a tensión diagonal.[27]



5.4.1 Fabricación de los Muretes.

Los muretes para el ensayo de tensión diagonal se construyeron utilizando un mortero de pega de la misma proporción al utilizado en los ensayos de resistencia a la compresión previamente explicados. De igual forma se mantuvieron las condiciones de curado. Ver Figura 5-6

Figura 5-6. Fabricación y curado de muros para ensayo de tensión diagonal.



5.4.2 Proceso de Ensayo de los Muretes.

Los muretes se sometieron a una carga aplicada sobre la diagonal del muro y se determinó el acortamiento de la diagonal en función de la carga aplicada. Debido a la dimensión del murete, no fue posible estudiar el comportamiento relacionado con el alargamiento transversal del elemento. La carga sobre la diagonal fue aplicada mediante un equipo hidráulico, el cual transmitió la carga a unos soportes metálicos y estos a su vez la transmiten al elemento de mampostería. Ver Figura 5-7.

Figura 5-7. Montaje para ensayo de tensión diagonal.



5.4.3 Resultados ensayo de tensión diagonal.

De acuerdo a la NTC 4925 el esfuerzo de tensión diagonal se determina por medio de la siguiente expresión:

$$f_d = \frac{0.707 P}{A} \quad \text{Ec. 5-6}$$

Donde P es la carga axial aplicada al elemento de mampostería y A se calcula de la siguiente manera:

$$A = \frac{l+a}{2} * t * r \quad \text{Ec. 5-7}$$

Donde

l ; a : Longitud de las aristas del murete.

t : Espesor del murete

r : Relación entre el área sólida y el área bruta de la sección transversal.

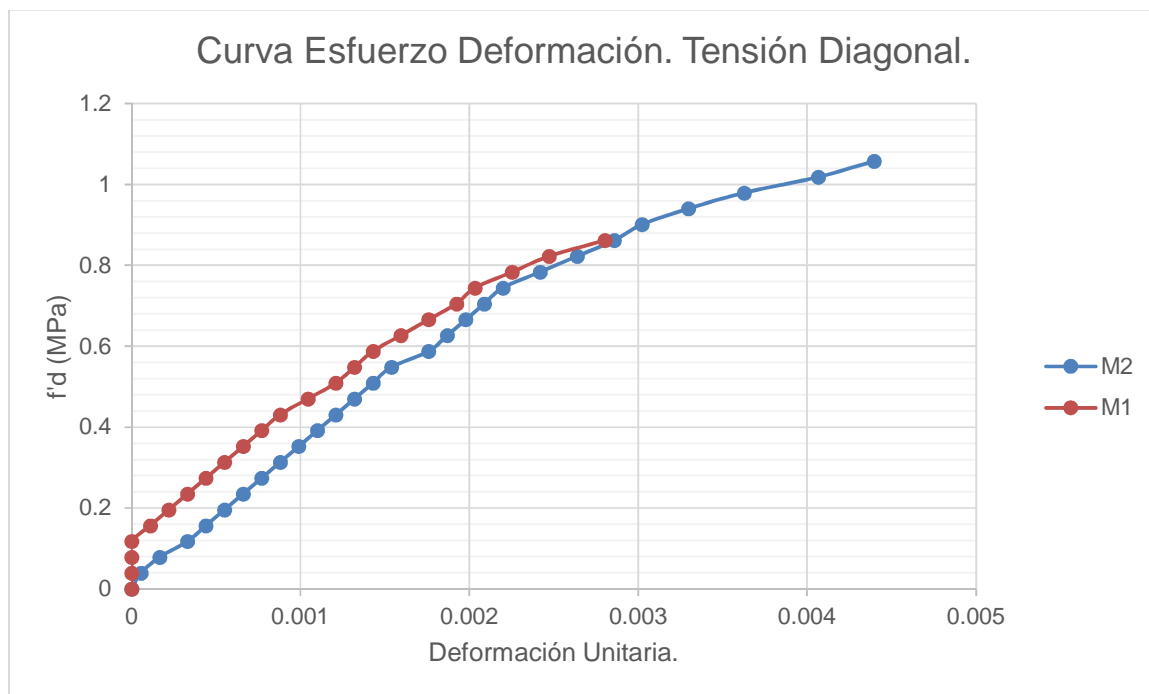
En la Tabla 5-7 se presentan los valores correspondientes a los muretes ensayados

Tabla 5-7. Dimensiones de los muretes ensayados a tensión diagonal.

<i>Murete</i>	<i>l (m)</i>	<i>a (m)</i>	<i>t (m)</i>	<i>r</i>
<i>1</i>	<i>0.40</i>	<i>0.40</i>	<i>0.12</i>	<i>0.71</i>
<i>2</i>	<i>0.37</i>	<i>0.37</i>	<i>0.12</i>	<i>0.71</i>

Los resultados obtenidos del ensayo de tensión diagonal se presentan en la Figura 5-8. Se puede evidenciar que el esfuerzo máximo asociado a la tensión diagonal se encuentra alrededor de $f_d = 1.6$ a 1.95 MPa . Cabe resaltar que la curva presentada en la Figura 5-8 no muestra el instante de falla debido a que fue necesario retirar los instrumentos de medición para evitar daños de estas durante la falla del elemento.

Figura 5-8. Comportamiento Esfuerzo-Deformación Murete sometido a tensión diagonal.



5.4.4 Mecanismo de Falla.

La Figura 5-9 muestra los mecanismos de falla en los muretes ensayados a tensión diagonal. Se observa que el Murete M1 presenta una falla por deslizamiento. La falla por deslizamiento se presenta por falla en la adherencia entre el mortero de pega y la unidad de mampostería. El Murete M2 presenta un mecanismo de falla por tensión diagonal, que corresponde a una falla tanto de la unidad de mampostería como del mortero de pega. En la Figura 5-8 se puede observar que la capacidad máxima del murete M1 es inferior a 1 MPa, mientras que en el murete M2 supera 1 Mpa. Se evidencia que el mecanismo de falla

por deslizamiento, murete M1, disminuye la capacidad de resistencia del murete en comparación con el mecanismo de falla del Murete M2.

Figura 5-9. Mecanismo de Falla en muretes sometidos a tensión diagonal.

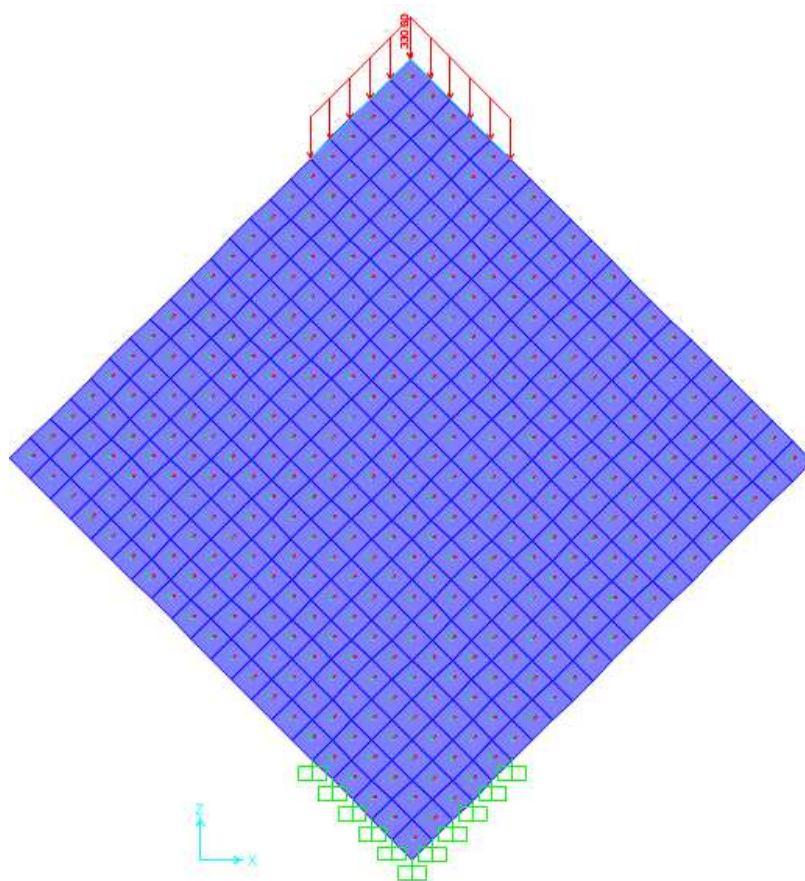
	
<p>(a) Murete M1. Mecanismo de falla por deslizamiento.</p>	<p>(b) Murete M2 Mecanismo de falla por tensión diagonal en unidades.</p>

5.4.5 Comparación Mecanismo de Falla con Análisis de Elementos Finitos.

Con el objetivo de comparar el comportamiento evidenciado en el ensayo realizado de tensión diagonal, se realizó un modelo numérico mediante el programa SAP2000. El

modelo se realizó utilizando un elemento tipo Shell Think implementando un análisis elástico. Las propiedades de la sección y de los materiales se definieron a partir de los resultados de los ensayos realizados sobre las unidades de mampostería y sobre los muretes a compresión. Se aplicó una carga de 300 N/m en la zona superior del modelo, con el objetivo de representar la carga máxima transmitida por los apoyos metálicos durante el ensayo realizado. En la Figura 5-10 se presenta el modelo realizado.

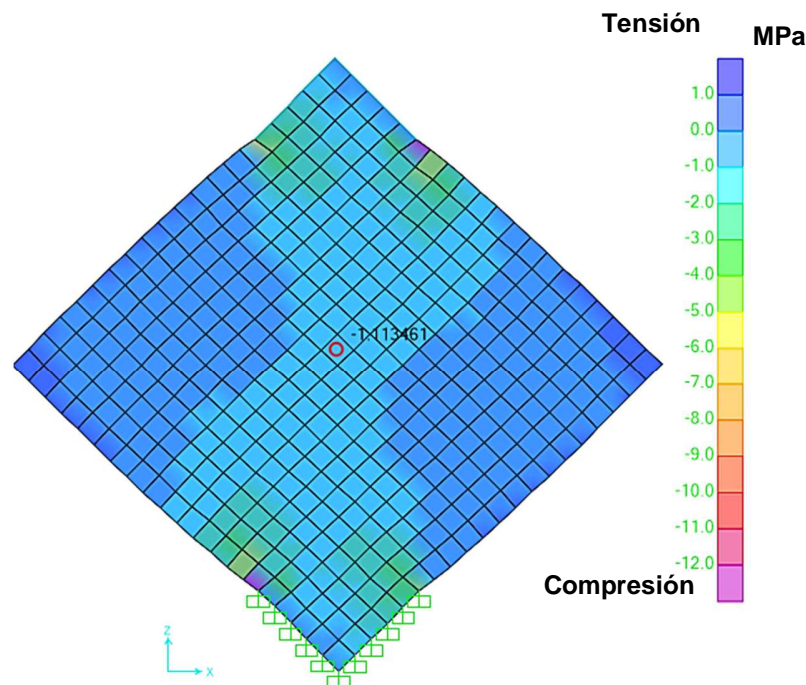
Figura 5-10. Modelo Muro sometido a Tensión Diagonal. Sap2000.



En la **Figura 5-11** se establece que la transmisión de esfuerzos principalmente se da por compresión en las unidades localizadas en la sección central del elemento. Los valores de

los esfuerzos en la zona central, de acuerdo al modelo realizado, se encuentran entre 1.0 a 2.0 MPa, los cuales son valores muy cercanos a los establecido en el ensayo experimental. El comportamiento presentado en la Figura 5-11 es consistente con el mecanismo de falla presentado por el Murete M2. Ver Figura 5-9

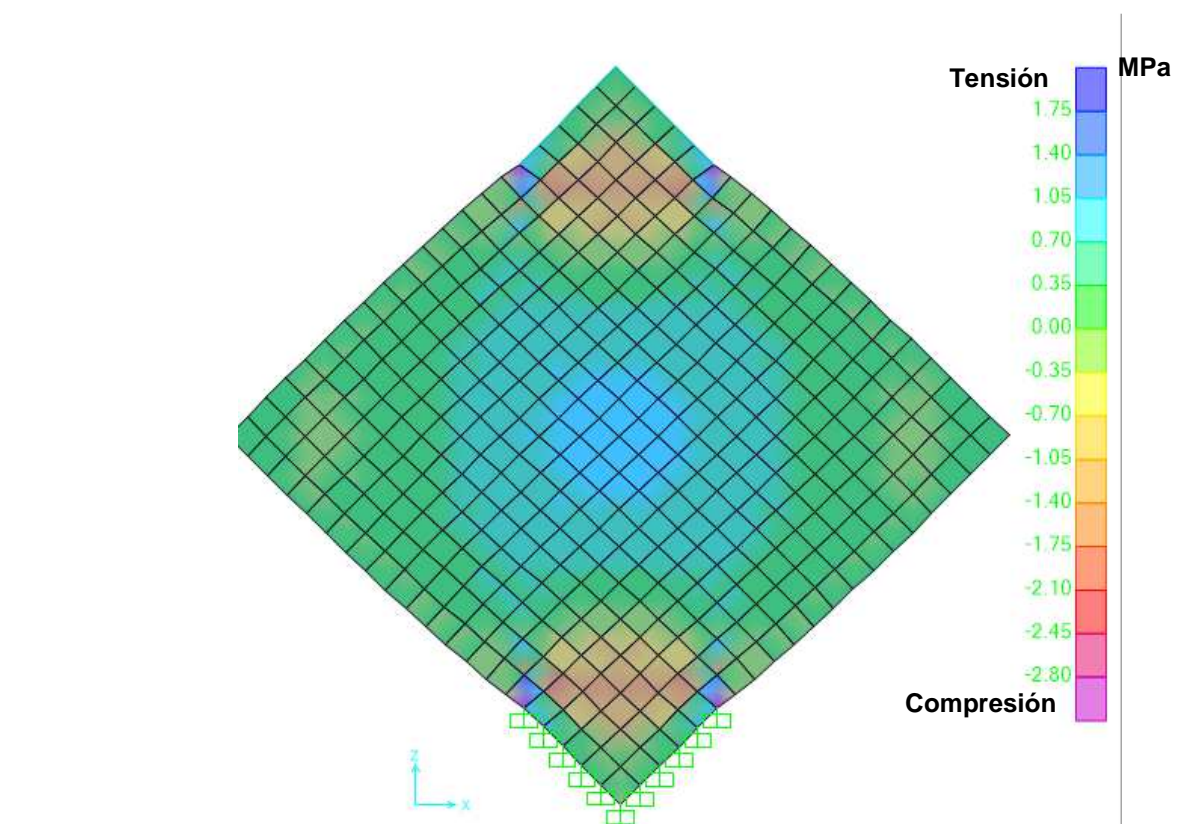
Figura 5-11. Estado de Esfuerzos respecto al Eje Z-Z.



El mecanismo de falla presentado por el Murete M1, el cual corresponde a deslizamiento, se puede asociar a la condición de esfuerzos presentada en la Figura 5-12. Se pudo establecer que de acuerdo a las condiciones de carga del elemento, se presenta una condición de esfuerzos de tensión en la zona central del elemento. La condición de esfuerzo de tensión, sumado al esfuerzo de compresión explicado en el apartado anterior, puede conllevar a la acción de un esfuerzo cortante sobre el mortero de pega. Si este esfuerzo cortante que actúa sobre el mortero de pega es mayor que resistencia, se puede

presentar una falla por deslizamiento, como la presentada en el Murete M1. Una adherencia mejor entre el mortero de pega y las unidades de mampostería del murete M2 evitó la falla por deslizamiento. Ver Figura 5-9

Figura 5-12. Estado de Esfuerzos principales.



La presencia de esfuerzos cortantes en la junta horizontal entre las unidades y el mortero, debe ser un aspecto a tener en cuenta en futuras investigaciones, ya que es un parámetro que compromete la estabilidad del elemento. Es necesario estudiar la adherencia entre el

mortero de pega y la unidad de mampostería, así como la posibilidad de implementar acero de refuerzo en el mortero de pega con el fin de aumentar su capacidad.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. La ceniza volante y la escoria de alto horno presentan un alto potencial de aplicación como material cementante para la construcción y fabricación de elementos constructivos.
2. Aunque la ceniza volante y la escoria de alto horno han sido utilizadas en la industria de la construcción, como complemento del cemento ordinario, cada vez es más factible su utilización como único material cementante. Lo anterior gracias a la implementación de procesos como la activación alcalina. La cual permite optimizar y potencializar las propiedades cementantes de dichos materiales.
3. La comprensión de los mecanismos de reacción entre la ceniza volante o la escoria de alto horno y la solución alcalina, requiere de la profundización en las investigaciones de tal forma que permita establecer estándares y procesos de diseño de este tipo de mezclas confiables para garantizar resistencias deseadas.
4. La temperatura de curado es un factor fundamental para garantizar una adecuada resistencia en los elementos fabricados a partir de mezclas activadas

alcalinamente. Las condiciones de curado potencializan la reacción entre la solución alcalina y los materiales silico-aluminosos, lo cual se traduce en mayores ganancias de resistencia a la compresión y en una mayor cohesión de la mezcla.

5. Debido a la necesidad de establecer curado a temperaturas mayores a la temperatura ambiente, se evidencia que una de las aplicaciones con mayor potencialidad para las mezclas activadas alcalinamente corresponde a la fabricación de elementos de construcción prefabricados. Lo anterior asociado a que durante la producción de elementos prefabricados es posible controlar aspectos como la concentración de la solución alcalina, las proporciones de mezcla y la temperatura de curado.
6. Las características del proceso de activación alcalina de las mezclas y del proceso de curado, permiten obtener resistencias adecuadas a tempranas edades, sin la necesidad de utilizar aditivos acelerantes como los utilizados en el concreto convencional. Esta característica puede ser una gran ventaja en los procesos de producción de elementos prefabricados.
7. Los resultados de la presente investigación demuestran que las mezclas activadas alcalinamente de ceniza volante y escoria de alto horno son potencialmente aptas para la fabricación de unidades de mampostería estructural. Desarrollan resistencias mecánicas adecuadas sin el uso del cemento ordinario.

8. El estudio del comportamiento mecánico de las unidades de mampostería fabricadas, tanto de manera individual como en su conjunto con el mortero de pega, permite evidenciar que dichas unidades son viables para la implementación en la industria de la construcción. Sin embargo es necesario comprender aún más el comportamiento de estos elementos ante la acción de diferentes tipos de solicitaciones.

9. La implementación de unidades de mampostería fabricados a partir de mezclas activadas alcalinamente, presenta un panorama ambientalmente amigable para la industria de la construcción, en el cual será posible disminuir los impactos asociados a la producción de unidades de mampostería en arcilla o en concreto debido al uso de materias primas asociadas a subproductos industriales como lo son la ceniza volante y la escoria de alto horno.

6.2 Recomendaciones

De acuerdo a los resultados de la investigación y a las conclusiones previamente mencionadas, se establecen las siguientes recomendaciones.

1. Es necesario emprender investigaciones que permitan establecer un procedimiento de diseño de mezcla acertado para garantizar una resistencia determinada del material. Dicha investigación deberá estar orientada al control de las variables



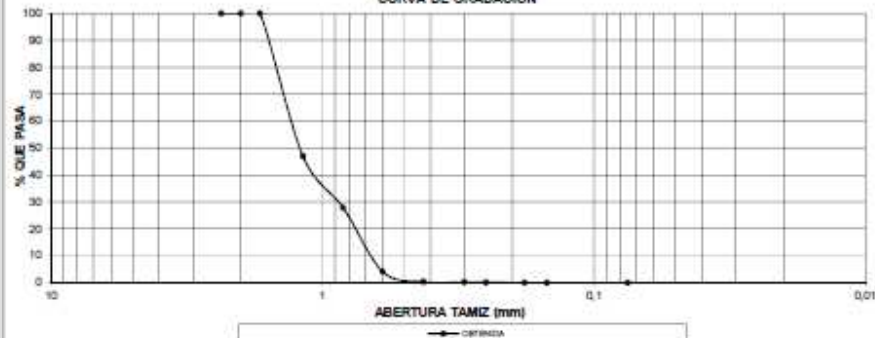
relacionadas con la cantidad de material silico-aluminoso utilizado como cementante, la concentración de la solución alcalina y la relación entre la solución alcalina y el material cementante. Así mismo es fundamental profundizar en el efecto de los agregados sobre el comportamiento final de la mezcla activada alcalinamente.

2. Se recomienda estudiar el efecto de temperaturas de curado por encima de 80°C, temperatura máxima estudiada en la presente investigación, en relación al comportamiento mecánico y al efecto de la temperatura sobre la microestructura de la mezcla.
3. Para futuras investigaciones en las cuales las mezclas activadas alcalinamente sean utilizadas para la fabricación de unidades de mampostería, se recomienda estudiar diferentes configuraciones geométricas para la unidad de mampostería, con el fin de buscar una configuración más adecuada en términos del volumen de material utilizado y de la resistencia obtenida.
4. Es fundamental investigar el comportamiento de muros construidos a partir de las unidades de mampostería fabricadas con mezclas alcalinamente activadas, principalmente el comportamiento ante cargas horizontales. De igual forma es necesario investigar la interacción del mortero de pega, fabricado a partir de cemento ordinario, y la unidad de mampostería fabricada con mezcla activada alcalinamente.

5. Es propicio buscar alianzas de investigación de la academia con aquellos sectores generadores de materiales silico-aluminosos, de tal forma que se puedan generar procesos de investigación amplios sin limitantes relacionados con la cantidad de material disponible. Lo anterior permitirá obtener resultados de aplicación en el corto y mediano plazo en la industria de la construcción.

A. Anexo: Fichas Técnicas de Materiales utilizados

Arena

 <p>SUELOS Y PAVIMENTOS GREGORIO ROJAS & CIA. LTDA.</p>	<p>INFORME DE ENSAYO ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO NTC 1622-99 Referencia: SYP-PT-07-014-014</p>		 <p>ONAC ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN</p>												
	<p>PROYECTO: ACTUALIZACIÓN ANALISIS GRANULOMETRICO CLIENTE: ARENA SILICIA & ARQUITECTOS S.A.S. DIR. CLIENTE: CALLE 25 No 99 -56 B. San Jose Localidad Fontibon CÓDIGO: 0571</p>														
<p>FECHA DE ENSAYO: 2016-02-08 ORDEN DE TRABAJO No. 7474 INFORME DE ENSAYO No. 7474-002C</p>															
<p>SONDEO: - MUESTRA: 20-50 PROFUNDIDAD(m): - DESCRIPCIÓN: Arena gruesa a media de color amarillo pálido y gris claro. Redondeada a subredondeada. OBSERVACIONES: Coef. De Curvatura: 0,88 Coef. De Uniformidad: 1,88 Diámetro Efectivo (mm): 0,68 Este informe reemplaza al INF7474-002</p>															
<p>EQUIPOS: Balanza No: 08 Homo: HN-01</p>															
<p>Peso total de la muestra seca (g) 100,5 Peso muestra lavado sobre tamiz 300 (g) 100,5</p>		<p>Suma pesos retenidos (g) 100,5 Error% 0,00</p>													
TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	PESO RETENIDO CORREGIDO (g)	% RETENIDO	% PASA	<p>CONTENIDO DE HUMEDAD</p> <table border="1"> <tr><td>Recipiente</td><td>-</td></tr> <tr><td>P₁ (g)</td><td>-</td></tr> <tr><td>P₂ (g)</td><td>-</td></tr> <tr><td>P₃ (g)</td><td>-</td></tr> <tr><td>Humedad (%)</td><td>-</td></tr> </table>	Recipiente	-	P ₁ (g)	-	P ₂ (g)	-	P ₃ (g)	-	Humedad (%)	-
Recipiente	-														
P ₁ (g)	-														
P ₂ (g)	-														
P ₃ (g)	-														
Humedad (%)	-														
-	-	-	-	-											
3"															
2"															
N8	0,0	0,0	0,0	100,0											
N10	0,0	0,0	0,0	100,0											
N12	0,0	0,0	0,0	100,0											
N16	53,3	53,3	53,0	47,0											
N20	19,2	19,2	19,1	27,9											
N30	23,9	23,9	23,8	4,1											
N40	3,8	3,8	3,8	0,3											
N50	0,1	0,1	0,1	0,2											
N60	0,1	0,1	0,1	0,1											
N80	0,1	0,1	0,1	0,0											
N100	0,0	0,0	0,0	0,0											
N200	0,0	0,0	0,0	0,0											
FONDO	0,0	0,0	0,0	-											
	100,5	100,5													
P1 = Peso del recipiente mas muestra húmeda		P2 = Peso del recipiente mas muestra seca		P3 = Peso del recipiente											
<p>CURVA DE GRADACION</p>  <p>ABERTURA TAMIZ (mm)</p>															
<p>REVISÓ Y APROBÓ</p> <p>ING. JOHN G. ORDUZ GÓMEZ SUB DIRECTOR TÉCNICO</p>															
<p>LOS RESULTADOS PRESENTADOS CORRESPONDEN ÚNICAMENTE A LA MUESTRA ENTREGADA A ANALISIS. ESTE INFORME NO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD O PARCIALMENTE, SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL LABORATORIO QUE LO EMITE. ESTE INFORME NO ES VÁLIDO SIN LA FIRMA ORIGINAL, DE QUIEN REVISO Y APROBÓ, Y EL SELLO.</p> <p>OFICINAS Y LABORATORIO: Calle 70A No. 62 - 37 Tels. 226 47 60 630 04 73 Teletels 343 99 30 Bogotá, D.C. - Colombia E-mail: laboratorio.suelosypavimentos@gmail.com / yehcio.com</p>															

ASG

Hidróxido de Sodio

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	106498
Denominación	Sodio hidróxido en lentejas, p.a. EMSURE® ISO

caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, muéstrele la etiqueta).

No. CE 215-185-5

2.3 Otros peligros
Ninguna conocida.

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancia

Formula	NaOH	HNaO (Hill)
No. CAS	1310-73-2	
No. CE	215-185-5	
Masa molar	40,00 g/mol	

Componentes peligrosos (REGLAMENTO (CE) No 1272/2006)

Nombre químico (Concentración)

No. CAS	Número de registro	Clasificación
Sodio hidróxido (<= 100 %)		
1310-73-2	*)	Corrosión cutánea, Categoría 1A, H314 Corrosivos para los metales, Categoría 1, H290

*) No hay disponible un número de registro para esta sustancia, ya que la sustancia o su uso están exentos del registro, según el artículo 2 del Reglamento REACH (CE) núm. 1067/2006, el tonelaje anual no requiere registro o dicho registro está previsto para una fecha posterior.

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

Componentes peligrosos (1999/45/CE)

Nombre químico (Concentración)

No. CAS	Clasificación
Sodio hidróxido (<= 100 %)	
1310-73-2	C, Corrosivo; R35

El texto completo de las frases R mencionadas en esta Sección, se indica en la Sección 16.

3.2 Mezcla
no aplicable

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

El socorrista necesita protegerse a sí mismo.

Tras inhalación: aire fresco. Consultar un médico.

Tras contacto con la piel: aclarar con abundante agua. Eliminar ropa contaminada. Llame inmediatamente al médico.

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Llamar inmediatamente al oftalmólogo.

Tras ingestión: hacer beber agua (máximo 2 vasos), evitar el vómito (¡peligro de perforación!). Llame inmediatamente al médico. No proceder a pruebas de neutralización.

Silicato de Sodio.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Nombre del Producto: SILICATO DE SODIO - SOLUCION
Fecha de Revisión: Febrero 2016 – Revisión No.6



SAUD	2
INFLAMABILIDAD	0
REACTIVIDAD	0
PROTECCION PERSONAL	X

NTPA

HMIS

SECCION 1: IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPANIA

PRODUCTO

Nombre Químico: SILICATO DE SODIO SOLUCION - Na_2SiO_3
Número CAS: 1344-09-8
Sinónimos:

COMPañÍA: GTM

Teléfonos de Emergencia

México : +52 55 5831 7905 – SETIQ 01 800 00 214 00
Guatemala: +502 6628 5858
El Salvador: +503 2251 7700
Honduras: +504 2564 5454
Nicaragua: +505 2269 0361 – Toxicología MINSA: +505 22897395
Costa Rica: +506 2537 0010 – Emergencias 9-1-1. Centro Intoxicaciones +506 2223-1028
Panamá: +507 512 6182 – Emergencias 9-1-1
Colombia: +018000 916012 Cisproquim / (571) 2 88 60 12 (Bogotá)
Perú: +511 614 65 00
Ecuador: +593 2382 6250 – Emergencias (ECU) 9-1-1
Argentina +54 115 031 1774
Brasil: +55 21 3591-1868

SECCION 2: COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

SILICATO DE SODIO SOLUCION	CAS: 1344-09-8	35-40%
AGUA		65-70%

SECCION 3: IDENTIFICACION DE PELIGROS

Clasificación ONU:	no aplica		
Clasificación NFPA:	Salud: 2	Inflamabilidad: 0	Reactividad: 0
Clasificación HMIS:	Salud: 2	Inflamabilidad: 0	Físico: 0

VISION GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS.

¡Aviso! Nocivo por ingestión o inhalación. Causa irritación severa a la piel, ojos y tracto respiratorio.

7. Bibliografía

- [1] M. Symposium, "Canadian Masonry Symposium, Banff, Alberta, June 8 – 12, 2005 AUSTRALIAN MASONRY AT THE CROSSROADS 1," 2005.
- [2] A. Puskás, J. Virág, L. M. Moga, H. Szilágyi, M. Bindea, and A. K. Sz, "Environmental impact of masonry and RC frame structures," no. 25, pp. 2–7, 1987.
- [3] K. H. Yang, J. K. Song, and K. Il Song, "Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 39, pp. 265–272, 2013.
- [4] V. Václavík, V. Dirner, T. Dvorský, and J. Daxner, "the Use of Blast Furnace Slag.," *Metalurgija*, vol. 51, no. 4, pp. 461–464, 2012.
- [5] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1323–1329, 1999.
- [6] D. M. Roy, "Alkali-activated cements: Opportunities and challenges," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 249–254, 1999.
- [7] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A

- review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 7. pp. 1305–1314, 2008.
- [8] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. 2009.
- [9] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso, and T. Vázquez, “Alkali-activated fly ash/slag cements. Strength behaviour and hydration products,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1625–1632, 2000.
- [10] M. Juenger, “Effects of Supplementary Cementing Materials on the Setting Time and Early Strength of Concrete (FHWA/TX-08/0-5550-1),” vol. 7, no. 82, 2008.
- [11] a Neuwald, “Supplementary Cementitious Materials, Part I: Pozzolanic SCMs, What are SCMs and how can you use them to your advantage,” *Manuf. Concr. (September/October 2004)*, no. October, 2004.
- [12] G. K. Hoffman, “Pozzolans and Supplementary Cementitious Materials,” *World*, pp. 1161–1172, 1997.
- [13] X. Li, Z. Wang, and Z. Jiao, “Influence of Curing on the Strength Development of Calcium-Containing Geopolymer Mortar,” *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 11, pp. 5069–

5076, 2013.

- [14] A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1984–1992, 2005.
- [15] D. Suresh and K. Nagaraju, "Ground Granulated Blast Slag (GGBS) In Concrete – A Review "," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 2278–1684, 2015.
- [16] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer," *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 12, pp. 1073–1078, 2009.
- [17] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, and Y. B. Cheng, "Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, pp. 1367–1374, 2000.
- [18] A. R. Brough, M. Holloway, J. Sykes, and A. Atkinson, "Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars. Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 1375–1379, 2000.
- [19] A. R. Brough and A. Atkinson, "Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars - Part I. Strength, hydration and microstructure," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 865–879, 2002.

- [20] D. Krizan and B. Zivanovic, "Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 1181–1188, 2002.
- [21] C. Shi, a. F. Jiménez, and A. Palomo, "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 750–763, Jul. 2011.
- [22] D. Bondar, C. J. Lynsdale, N. B. Milestone, N. Hassani, and A. A. Ramezaniapour, "Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 4065–4071, 2011.
- [23] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico, and J. Rodríguez, "A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, pp. 2043–2056, 2011.
- [24] S. A. Bernal, J. L. Provis, B. Walkley, R. San Nicolas, J. D. Gehman, D. G. Brice, A. R. Kilcullen, P. Duxson, and J. S. J. Van Deventer, "Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 53, pp. 127–144, 2013.
- [25] D. M. Roy, W. Jiang, and M. R. Silsbee, "Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 2000, pp. 1879–1884, 2000.

-
- [26] R. J. Myers, S. A. Bernal, and J. L. Provis, "Cement and Concrete Research A thermodynamic model for C- (N-) A-S-H gel: CNASH _ ss . Derivation and validation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 66, pp. 27–47, 2014.
- [27] L. Baqueiro Fernández, F. Marín Gómez, J. Varela Rivera, and G. Vargas Marín, "Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto," *Ingeniería*, vol. 13, no. 2, pp. 41–50, 2009.

)